

Bachelorarbeit

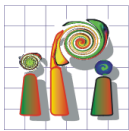
Untersuchung zur zweidimensionalen Qualitätskontrolle von Bildmosaiken

von
Oskar Wage

eingereicht am
11. November 2015

bei
Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen
und
Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation
Leibniz Universität Hannover



Bachelorarbeit für Herrn Oskar Wage

Fakultät für Bauingenieurwesen
und Geodäsie

Thema: Untersuchung zur zweidimensionalen Qualitätskontrolle von Bildmosaiken

Institut für Photogrammetrie
und GeoInformation
Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke

Aufgabenstellung:

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen
Tel. +49 511 762-3304
Fax +49 511 762-2483
E-Mail: wiggenhagen
@ipi.uni-hannover.de

Die aktuelle Aufgabe der Kampfmittelräumdienste besteht darin, Munitionsreste des zweiten Weltkriegs aufzuspüren und unschädlich zu machen.

11.05.2015

Für diese Zwecke wurden die historischen Luftbilder der Alliierten gescannt und stehen heute den Auswertestellen digital zur Verfügung.

Bei der anschließenden Georeferenzierung stellt sich jedoch dann oft das Problem der Identifikation von genügend Passpunkten, da sich die Situation am Boden über die Jahrzehnte inzwischen stark verändert hat.

Im Rahmen dieser Arbeit soll mittels Bündelblockausgleichung ein Bildverband mit möglichst wenigen Passpunkten verknüpft und daraus Orthophotomosaiken gerechnet werden.

Die Ergebnisdateien sollen auf die Qualität hin überprüft werden. Hier ist insbesondere auf Lagefehler im digitalen Orthophoto zu achten, die aufgrund fehlerhafter oder nicht vorhandener Höhendaten entstanden sind.

Die Orthophotomosaiken sind mit zusätzlich bereitgestellten ASTER Höhendaten und mit aus den Original-Bilddaten generierten Höhendaten zu berechnen und zu bewerten.

Zusammenfassend sind Aussagen zu treffen, ob das Verfahren von seiner Ergebnisgenauigkeit für die Kampfmittelräumdienste geeignet ist.

Ausgabetermin: 11.05.2015

Abgabetermin: 11.11.2015

Besucheradresse:
Nienburger Straße 1
30167 Hannover
www.ipi.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Zentrale:
Tel. +49 511 762 0

Eidesstattliche Erklärung

Ich bestätige die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die verwendeten Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Des Weiteren versichere ich, dass aus fremden Quellen übernommene Gedanken entsprechend gekennzeichnet sind, und erkläre, dass die vorliegende Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht im Rahmen eines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht wurde.

Oskar Wage

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Verfügbare Daten	2
2 Grundlagen	5
2.1 Zentralprojektion	5
2.2 Orientierungen	7
2.3 Pass-, Verknüpfungs- und Kontrollpunkte	13
2.4 Rückwärtsschnitt	14
2.5 Vorwärtsschnitt	16
2.6 Bündelblockausgleichung	16
2.7 Orthophoto	18
2.8 Orthophotomosaik	19
3 Rahmenbedingungen und Konzept	21
3.1 Verwendete Software	21
3.2 Generierung von Orthophotos	22
3.2.1 Vorbereitung der Bilder und Orientierungen	22
3.2.2 Generierung eines vorläufigen Orthophotos	22
3.2.3 Vorbereitung und Bestimmung von Passpunkten	22
3.2.4 Erzeugung eines endgültigen Orthophotos	22
3.3 Überprüfung	23
4 Durchführung	24
4.1 Generierung von Orthophotos	24
4.1.1 Vorbereitung der Bilder und Orientierungen	24
4.1.2 Generierung eines vorläufigen Orthophotos	26
4.1.3 Vorbereitung und Bestimmung von Passpunkten	27
4.1.4 Erzeugung eines endgültigen Orthophotos	29
4.2 Überprüfung	30
4.2.1 Abweichung zur Referenz	30
4.2.2 Optische Kontrolle	34
5 Fazit und Ausblick	39
Literaturverzeichnis	iv
A Verwendete Programmparameter	v
B Differenzen der Kontrollpunkte	vi

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispielhaftes historisches Luftbild	3
2.1	Modell der Zentralprojektion	5
2.2	Innere Orientierung mit Parametern	8
2.3	Äußere Orientierung mit Parametern	9
2.4	Relative Orientierung über Folgebildanschluss mit Parametern	11
2.5	Relative Orientierung über unabhängige Bildpaare mit Parametern	11
2.6	Absolute Orientierung mit Parametern	12
2.7	Prinzip Rückwärtsschnitt	15
2.8	Modellanordnung Bündelblock	17
2.9	Orthoprojektion eines Bildes	18
2.10	Vergleich von Mosaiken mit und ohne radiometrische Anpassung	20
4.1	Auflösungsvergleich anhand eines Bildausschnittes	25
4.2	Modellansicht von Photoscan	27
4.3	Passpunkt- und Bildverteilung für Flug US 33/2570	28
4.4	Passpunktverteilung für die Flüge 181-42-31 und 181-43-31	29
4.5	Abweichungen der Orthophotos von Flug US 33/2570	32
4.6	Abweichungen von Orthophotos der Flüge 181-42-31 und 181-43-31	33
4.7	Betrachtung eines Bildübergangs im Mosaik von Flug US 33/2570	35
4.8	Vergleich eines Bildausschnitts im Mosaik von Flug US 33/2570	36
4.9	Bildübergang im Mosaik der Flüge 181-42-31 und 181-43-31	37
4.10	Wegverlauf im Orthophotomosaik der Flüge 181-42-31 und 181-43-31	38

1 Einleitung

Nach einer kurzen Motivation werden die Ziele und verfügbaren Daten für diese Arbeit vorgestellt. Anschließend wird in den Grundlagen auf Verfahren zur Erzeugung digitaler Orthophotos eingegangen. Im dritten Kapitel wird ein Konzept zum Erreichen der Ziele vorgestellt, um dieses im nächsten Kapitel konkret umzusetzen und die Ergebnisse auszuwerten. Abgeschlossen wird die Arbeit mit einem Fazit und Ausblick.

1.1 Motivation

Wie von [Albertz, 2007, S. 192] beschrieben, sind Altlasten vergangener Kriege auch zur heutigen Zeit in Deutschland nach wie vor von Relevanz. Viele Blindgänger von Fliegerbomben aus dem zweiten Weltkrieg liegen noch immer unbemerkt, gerade in ländlichen Regionen, unter der Erdoberfläche. Eine in Deutschland übliche Methode der Suche nach diesen ist die Auswertung historischer Luftbilder. Während und zum Ende des zweiten Weltkrieges wurden von den Alliierten Luftbilder erstellt, auf denen die damaligen Bombenkrater zu erkennen sind. Anhand der Ausmaße dieser lässt sich darauf schließen, ob die Bombe explodiert ist und einen deutlichen Krater hinterlassen hat, oder es sich bei kleinen Löchern um potentielle Blindgänger handelt. Aufgrund dieser Vorkenntnisse kann die Suche vor Ort deutlich effizienter gestaltet werden. Allerdings besteht dabei die Schwierigkeit nach über 60 Jahren einen Bezug zwischen den Bildern und der inzwischen veränderten Topographie herzustellen.

1.2 Zielsetzung

Ziel ist es mit möglichst geringem Aufwand georeferenzierte Orthophotos der historischen Situation zu erstellen. In [AhKmr, 2014, A-2.3.2] wird eine Lageabweichung des Ergebnisses von unter drei Metern angestrebt. Aufgrund des Alters und des Zustandes der Bilder ist das Suchen geeigneter Passpunkte für die Georeferenzierung sehr zeitintensiv. Vermutlich aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit anschließend, zum Nachweis der Genauigkeit, die zur Orientierung verwendeten Passpunkte ebenfalls als Kontrollpunkte verwendet. Dies schränkt die Aussagekraft der Kontrolle jedoch stark ein.

Gewünschtes Ergebnis ist ein digitales Orthophoto mit einer Lageabweichung von unter drei Metern, gemessen an unabhängigen Kontrollpunkten. Des Weiteren soll die aufwändige Suche nach Passpunkten vereinfacht werden. (vgl. [AhKmr, 2014])

1.3 Verfügbare Daten

Als Hauptdaten liegen Bildverbände des gleichen Gebietes vor. Zum Erzeugen der Orthophotos können außerdem Höhendaten und für Qualitätsvergleiche ein aktuelles Orthophoto des Gebietes genutzt werden.

Bildverbände mit Näherungswerten Kern des Datensatzes sind mehrere Bildsätze des Gebietes der Munitionsanstalt in Wulfen, welche zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden. Die ältesten Bilder stammen aus den Jahren 1943 - 1945 und wurden von Alliierten zu Erkundungszwecken während des zweiten Weltkrieges gemacht. Auf diesen sind die Bombenkrater, welchen das Interesse der Blindgängersuche gilt, am deutlichsten zu erkennen. Aus dem Aufnahmepurpose und dem technischen Entwicklungsstand der damaligen Zeit resultiert, wie auch in [Redecker, 2008, S. 2 f.] angemerkt, eine optisch und geometrisch schlechtere Qualität als bei heutigen speziell für photogrammetrische Zwecke durchgeführten Bildflügen. Aus diesem Grund stehen keine markierten Passpunkte zur Verfügung, die zur Bestimmung der Orientierungen genutzt werden könnten. Ein grober Eindruck des Bildmaterials kann anhand von Abbildung 1.1 gewonnen werden. Diese zeigt beispielhaft ein Bild eines Fluges von 1945. Im Vergleich zu heute wurden die Bilder analog mit fotografischen Filmen oder Fotoplatten aufgenommen. Die Originale lagern, wie in [Albertz, 2007, S. 66] beschrieben, weltweit in unterschiedlichen Archiven. Von diesen wurden Kontaktkopien erstellt und anschließend unter Einsatz von Flachbettscannern digitalisiert. In [AhKmr, 2014, A-2.3.1] wird erläutert, dass sich der Einsatz photogrammetrischer Scanner angesichts der im Bildmaterial bereits enthaltenen geometrischen Verfälschungen nicht rentiert und mit einer Auflösung von 1200 dpi (dots per inch) beim Scannen alle Bilddetails ausreichend erfasst werden.

An relevanten Informationen sind über die Bilder das jeweilige Aufnahmedatum, die näherungsweise Position zum Aufnahmezeitpunkt und die ungefähre Flughöhe bekannt. Die Koordinaten sind teilweise im DHDN / Gauß-Krüger System Zone 2 und teils in Zone 3 (European Petroleum Survey Group (EPSG) Code 31466 und 31467) angegeben. Von den inneren Orientierungen der Kameras sind lediglich die Kammerkonstanten aufgelistet. Für die in den Bildern sichtbaren Rahmenmarken sind keine Sollkoordinaten verfügbar und daher die Bildhauptpunkte unbekannt.

Höhenmodell Für das von den Bildverbänden abgedeckte Gebiet steht ein rasterförmiges digitales Höhenmodell zur Verfügung. Die Daten sind vom ASTER-Instrument (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) an Bord des Fernerkundungssatelliten Terra aufgenommen worden und haben eine Bodenpixelgröße von 15 m bei einer Höhenauflösung von ganzen Metern. Die Erdoberfläche wird mittels passiver



Abbildung 1.1: *Eines der zur Verfügung stehenden historischen Luftbilder einer Siedlung im ländlichen Raum als Beispiel der gegebenen Daten. Am Rand des Bildes sind teilweise Rahmenmarken, Beschriftungen und Teile von Klebestreifen zu sehen. Auffällig ist des weiteren die unregelmäßige Belichtung des Bildes.*

Fernerkundung stereoskopisch erfasst, woraus ein Oberflächenmodell berechnet wird. Bedingt durch die Rastergröße entspricht dies jedoch in der Praxis, abgesehen von Gebieten mit zum Beispiel zusammenhängenden Waldflächen, einem Geländemodell. Gespeichert sind die Höhenwerte je Pixel an entsprechender Stelle in einem georeferenzierten Tagged Image File (GeoTIF-Bild). Die verwendeten Daten stammen aus der Zeit zwischen dem Start des Satelliten Ende 1999 und der Veröffentlichung der zweiten Version des globalen digitalen Höhenmodells im Oktober 2011. (vgl. [Tan, 2004])

Aktuelles Orthophoto Als bereits georeferenziertes und entzerrtes Bildmaterial des Gebietes ist ein aktuelles - folglich maximal drei Jahre altes - digitales Orthophoto verfügbar. Die Bodenauflösung beträgt einer manuellen Messung nach etwa 70 cm. Dies deckt sich mit der Angabe in [AhKmr, 2014, A-2.3.2], dass als Referenz aktuelle digitale Orthophotos mit einer Bodenpixelgröße von mehr als einem halben Meter zu nutzen sind.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf einige Begriffe, elementare Prinzipien und gängige Verfahren zur Generierung von digitalen Orthophotos aus Luftbildern eingegangen.

2.1 Zentralprojektion

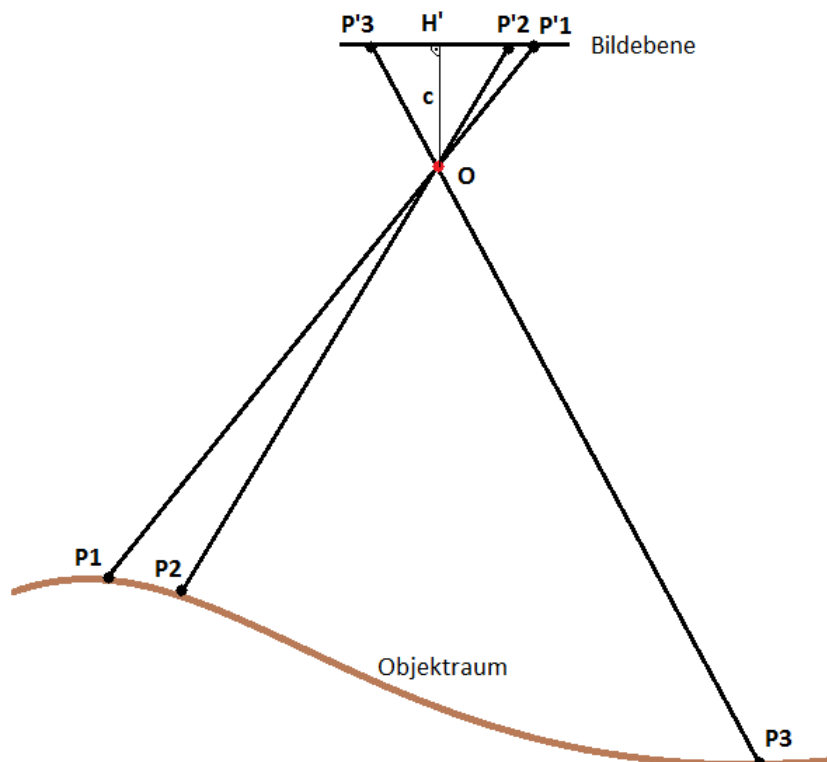


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Modells der Zentralprojektion. Die Objektpunkte (P_1 , P_2 , P_3) werden über das Projektionszentrum (O) in die Bildebene abgebildet.

Bei der Zentralprojektion handelt es sich laut [Konecny und Lehmann, 1984, S. 20] um das Hauptmodell der Photogrammetrie, welches die ideale mathematische Abbildung eines dreidimensionalen Objekts in eine zweidimensionale Ebene beschreibt. Dies ist ergänzend in Abbildung 2.1 veranschaulicht. In der Photogrammetrie werden üblicherweise Kameras zur Aufnahme von Photographien genutzt, deren Strahlengang als zentralprojektiv angenommen werden kann. Daraus resultiert nach [Albertz, 2007, S. 69], in Bezug auf Senkrechtbilder der Erdoberfläche, dass in tiefem Gelände liegende Punkte zur Bildmitte und höhere Punkte radial nach außen verschoben abgebildet werden.

Die Zentralprojektion wird von [Konecny und Lehmann, 1984, S. 20] anschaulich anhand einer Lochkammer beschrieben. Das Projektionszentrum (O) entspricht einem minimal kleinen Loch, in dem sich sämtliche Strahlen zwischen Objektraum und Bildebene schneiden. Als Bildebene wird die Fläche bezeichnet, auf die abgebildet wird. Bei der Senkrechten der Bildebene in das Projektionszentrum handelt es sich um die optische Achse. Ihr Schnittpunkt mit der Bildebene ist der Bildhauptpunkt (H'), welcher bei einer Kalibrierung ermittelt und durch Rahmenmarken im Bild gekennzeichnet wird. Die Kammerkonstante bezeichnet den Abstand von Bildhauptpunkt und Projektionszentrum.

In [Luhmann, 2010, S. 239 ff.] wird beschrieben, wie sich dank diesem Zusammenhang die Koordinate (X) von einem Punkt (P) im Objektraum aus dem Ortsvektor zum Projektionszentrum (X_0) und aus dem Bildvektor (x') vom Projektionszentrum zum Punkt bestimmen lässt. Der Bildvektor wird mittels einer räumlichen Drehmatrix (R) und einem Maßstab (m) zum Ortsvektor des Projektionszentrums in den Objektraum transformiert. Daraus ergibt sich die Formel (2.1) aus [Luhmann, 2010, S. 239] mithilfe welcher sich ein Punkt aus dem Bildkoordinatensystem in den Objektraum transformieren lässt.

$$X = X_0 + m \cdot R \cdot x' \quad (2.1)$$

Zu beachten ist, dass bei Verwendung von lediglich einem Bild, einem Bildpunkt keine konkrete Position im Objektraum zugeordnet werden kann, da der erwähnte Maßstabsfaktor individuell und unbekannt ist. Der Einsatz eines zweiten Bildes ermöglicht jedoch den Schnittpunkt der Strahlen zweier zugehöriger Bildpunkte zu bestimmen und daraus eine absolute Koordinate im Objektraum zu erhalten.

Die Drehmatrix legt die Orientierung der Bildebene im Objektraum fest und lässt sich unter anderem mit der Formel (2.2) nach [Kraus, 2004, S. 12] aus drei Drehwinkeln bestimmen.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

In [Luhmann, 2010, S. 239 ff.] wird erläutert, wie sich nach der Durchführung einiger Umformungen und dem Implementieren des Bildhauptpunktes ($H'(x'_0, y'_0)$) in Formel (2.1), der Maßstabsfaktor mittels Division der jeweils ersten beiden Komponenten durch die Dritte beseitigen lässt. Das Ergebnis sind die in [Luhmann, 2010, S. 240] zu findenden Formeln (2.3), welche allgemein als Kollinearitätsgleichungen bekannt sind.

$$\begin{aligned}
 x' &= x'_0 + z' \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x' \\
 y' &= y'_0 + z' \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y'
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Die verwendeten Rotationsparameter (r_{ik}) verweisen auf die einzelnen Zellen der Rotationsmatrix aus Formel (2.2). Die Variable z' entspricht laut [Kraus, 2004, S. 18] der negativen Kammerkonstante ($-c$) und ist daher durch diese ersetzbar. x'_0 und y'_0 beschreiben weiterhin die Lage des Bildhauptpunktes und bei $\Delta x'$ und $\Delta y'$ handelt es sich um in [Luhmann, 2010, S. 239 ff.] verwendete, optionale Verzeichnungparameter. X , Y und Z bilden die Koordinate des Objektpunktes, wohingegen X_0 , Y_0 und Z_0 die Position des Projektionszentrums im Objektraum beschreiben.

Auf diese Weise können bei bekannter innerer und äußerer Orientierung mit den Kollinearitätsgleichungen räumliche Objektkoordinaten in das entsprechende Bildkoordinatensystem überführt werden. Sie „beschreiben somit geometrisch den Vorgang einer zentralprojektiven Bildentstehung in einer Kamera“ [Luhmann, 2010, S. 241]. Aus diesem Grund sind die Kollinearitätsgleichungen mit die wichtigsten Gleichungen der Photogrammetrie. Außerdem können sie beispielsweise bei einer Bündelblockausgleichung direkt als Beobachtungsgleichungen verwendet werden, denn die beobachteten Bildkoordinaten werden in Abhängigkeit der Parameter der inneren und äußeren Orientierung und der Objektkoordinaten ausgedrückt.

2.2 Orientierungen

Zur weiteren Auswertung von Luftbildern sind zunächst die Bestimmung ihrer räumlichen Lage und die Ausrichtung im Aufnahmemoment notwendig. Dazu beschreibt die innere Orientierung die kameraspezifische Lage des Projektionszentrums zur Bildebene. Die Lage und Ausrichtung des Projektionszentrums im Objektraum ist als äußere Orientierung definiert. Als absolute Orientierung wird die eindeutige Ausrichtung einzelner Bilder im Raum bezeichnet, wohingegen die relative Orientierung allein die gegenseitige Lage zweier Bilder zueinander beschreibt. (vgl. [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 242 f.], [Kraus, 2004, S. 19])

Innere Orientierung Zu den Parametern der inneren Orientierung gehören, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, die Kammerkonstante (c) und die Lage des Bildhauptpunktes im Bildkoordinatensystem (x'_0, y'_0). Sie definieren das geometrische Modell der Aufnahmekamera. Die Kammerkonstante beschreibt, wie im Abschnitt zur Zentralprojektion erwähnt,

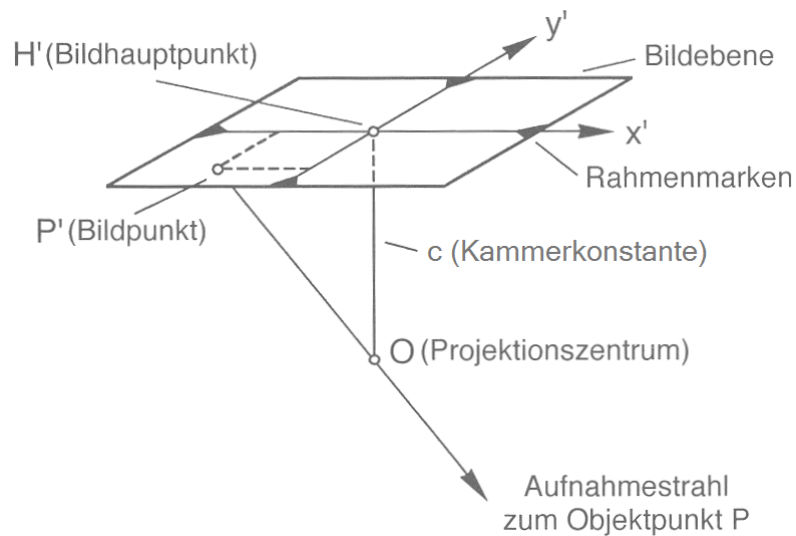


Abbildung 2.2: Veranschaulichung der Definition der inneren Orientierung mit den Parametern der Kammerkonstante (c) und dem Bildhauptpunkt ($H'(x'_0, y'_0)$). Außerdem ist beispielhaft der Strahlengang eines Bildpunktes (P') durch das Projektionszentrum (O) angegeben. Nach [Albertz, 2007, S. 34]

den Abstand zwischen Bildhauptpunkt und Projektionszentrum. Um die Tatsache zu berücksichtigen, dass der Bildhauptpunkt in der Praxis nicht genau mittig in der Bildebene liegt, wird er standardmäßig mittels zweier Bildkoordinaten beschrieben. In analogen Bildern ist die Position des Hauptpunktes üblicherweise an den Rändern mit sogenannten Rahmenmarken kenntlich gemacht.

Abhängig von den Ansprüchen an die Genauigkeit müssen in der Praxis weitere Parameter für die Abweichungen vom theoretischen Modell der Zentralprojektion eingeführt werden. Differenzen zur optimalen Abbildungsgeometrie entstehen zum Beispiel aufgrund einer nicht fehlerfreien Kameraoptik, einer unebenen und nicht völlig orthogonalen Bildebene und einer nicht vollständig starren Konstruktion und Befestigung der Linsen.

Dies hat zur Folge, dass die innere Orientierung eines jeden Aufnahmesystems einzeln bestimmt werden sollte. Dies kann zum einen durch Einführen der Parameter der inneren Orientierung als Unbekannte in die Bündelblockausgleichung geschehen oder vorab mit einer Kalibrierung unter Laborbedingungen, zum Beispiel vom Hersteller. (vgl. [Kraus, 2004, S. 19], [Luhmann, 2010, S. 8])

Äußere Orientierung Ergänzend zur inneren Orientierung werden durch die äußere Orientierung die Lage des Projektionszentrums und die Ausrichtung des Bildstrahlenbündels in einem, stellvertretend für den Objektraum, übergeordneten Koordinatensystem angegeben. Zur Festlegung der Lage dienen dazu drei Translationen (X_0, Y_0, Z_0) sowie drei Rotationswinkel als Parameter eines jeden Strahlenbündels für die Ausrichtung. Eine

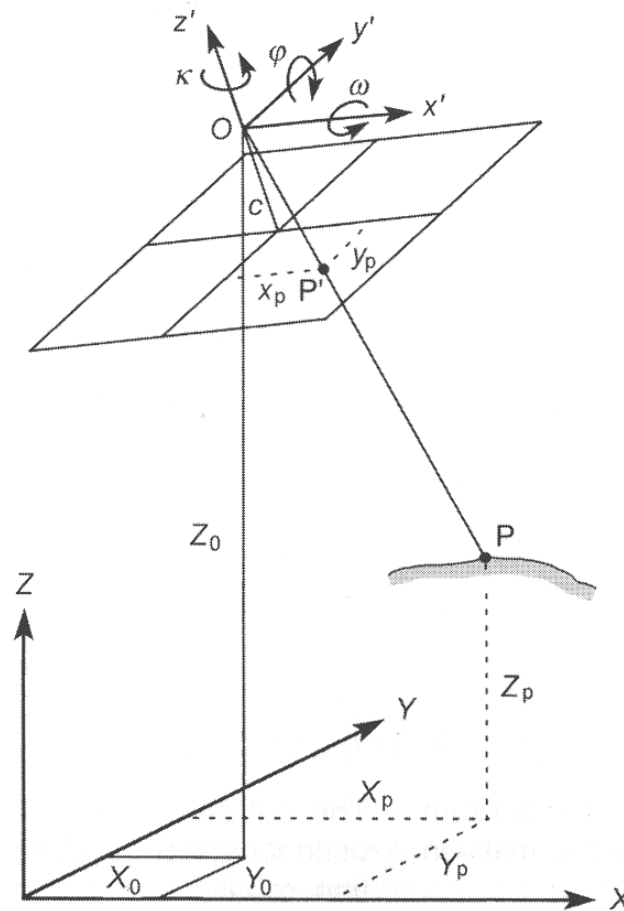


Abbildung 2.3: Erweiternde Darstellung der inneren um die äußere Orientierung eines Bildes. Hinzu kommen die drei Translationsparameter (X_0 , Y_0 , Z_0) und die drei Rotationen (ω , φ , κ). Ergänzend ist der Strahlengang eines Objektpunktes (P) durch die Bildebene (P') zum Projektionszentrum (O) skizziert. [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 221]

Veranschaulichung ist in Abbildung 2.3 gegeben.

In der Luftphotogrammetrie hat sich für die Definition der Drehwinkel die Konvention durchgesetzt, von einem rechtshändigen Koordinatensystem auszugehen, dessen x -Achse mit der Flugrichtung zusammenfällt. Daraus resultiert die Querneigung ω als Rotation um die x -Achse, die Längsneigung φ als Rotation um die y -Achse und schließlich die Kantung κ als Rotation um die z -Achse.

Zusammenfassen lässt sich die äußere Orientierung zu X_0 als Vektor der Koordinaten und der Rotationsmatrix R , welche die Drehwinkel enthält (zum Aufbau von R siehe Formel (2.2)).

Um die sechs genannten Parameter der äußeren Orientierung eines Bildes zu bestimmen, stehen inzwischen unterstützend inertielle Messeinheiten und satellitengestützte Positionierungsverfahren zur Verfügung. Die erreichten Genauigkeiten genügen jedoch nicht

immer. In der Regel werden die Parameter indirekt mithilfe von Passpunkten und einem räumlichen Rückwärtsschnitt bestimmt. Dazu werden Bildpunktmessungen zu bekannten, im übergeordneten System bestimmten Objektpunkten durchgeführt. Sind die inneren Orientierungsparameter bekannt, können anhand von drei in beiden Systemen bekannten Punkten und den Kollinearitätsgleichungen (siehe Formel (2.3)) die unbekannt Parameter bestimmt werden. (vgl. [Kraus, 2004, S. 19], [Luhmann, 2010, S. 8], [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 221])

Relative Orientierung Für die relative Orientierung, auch gegenseitige Orientierung genannt, werden keine Passpunkte im Objektraum benötigt, da keine Verknüpfung zu einem übergeordneten System stattfindet. Es wird lediglich die gegenseitige Ausrichtung der beiden Strahlenbündel in einem Modellkoordinatensystem zueinander mittels räumlicher Translationen und Rotationen bestimmt. Der Systemursprung ist im Projektionszentrum des linken Bildes festgelegt. Mangels Bezug und Maßstab zum Objektraum ist die Bestimmung realer Objektmaße nicht möglich.

Ziel ist es, die Strahlenbündel der Bilder in die korrekte gegenseitige Lage im Raum zu bringen, sodass sich Objektpunkte in einem räumlichen Modell durch sich schneidende Abbildungsstrahlen definieren lassen. Für eine gegenseitige Orientierung werden die beiden Bildebenen so ausgerichtet, dass sich an fünf, über den Schnittbereich beider Bilder verteilten, Punkten homologe Strahlenpaare schneiden. Dies hat zur Folge, dass sich die restlichen homologen Strahlenpaare beider Bilder schneiden und die Form des Objektes beschreiben.

Dabei sind zwei generelle Varianten möglich. Zum einen können beide zum Bildpaar gehörenden Projektionszentren bewegt werden, was als unabhängige Bildpaare bezeichnet wird. Die andere Möglichkeit ist, per Drehung und Verschiebung ein Projektionszentrum an das andere festgehaltene Projektionszentrum anzupassen. Dies wird Folgebildanschluss genannt.

Für den Folgebildanschluss wird, wie in Abbildung 2.4, im Projektionszentrum des ersten Bildes gelagert, das Modellkoordinatensystem anhand des Bildsystems definiert. Die räumlichen Translationen und Rotationen des ersten Bildes sind im Modell somit alle gleich Null. Das zweite Bild wird anschließend über jeweils drei eigene Translationen und Rotationen im vorher bestimmten Modellsystem und somit im Bildsystem des ersten Bildes beschrieben. Aus den Translationen ergibt sich ein Basisvektor. Das Modellsystem hat keinen festen Maßstab, wodurch eine der Basisvektorkomponenten frei gewählt werden kann und in der Regel die erste mit eins festgelegt wird. Dadurch bleiben die fünf unabhängigen relative Orientierungsparameter y_2 , z_2 , ω_2 , φ_2 und κ_2 übrig.

Bei der Variante der unabhängigen Bildpaare, welche in Abbildung 2.5 veranschaulicht

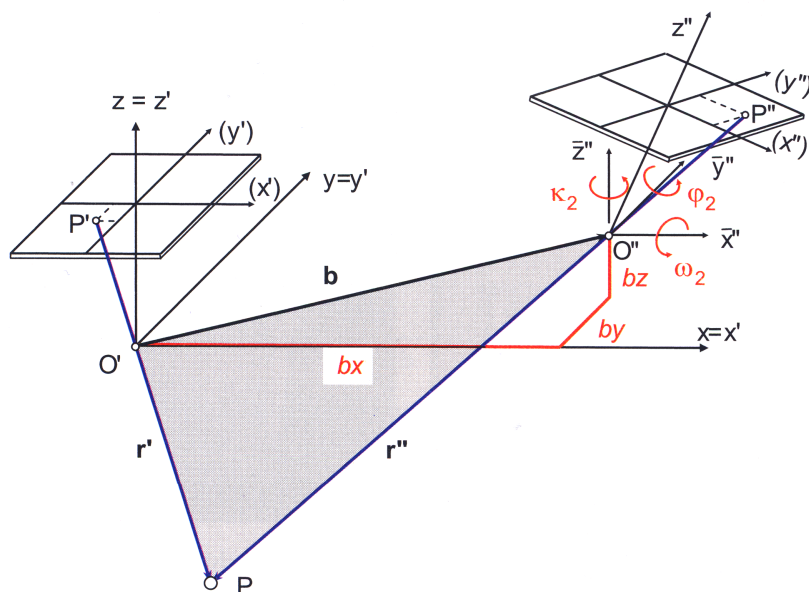


Abbildung 2.4: Definition der relativen Orientierung durch Folgebildanschluss eines Bildpaares. Dargestellt sind die beiden Bildebenen mit den fünf unabhängigen Parametern b_y , b_z , ω_2 , φ_2 und κ_2 . [Luhmann, 2010, S. 276]

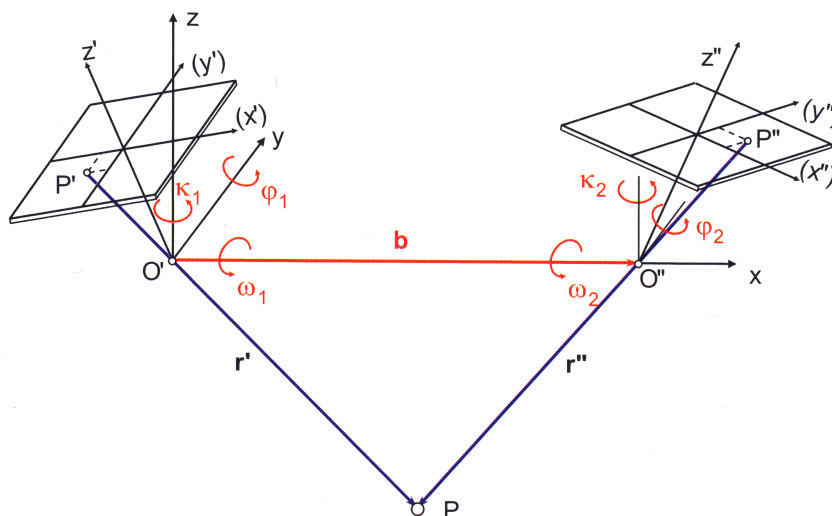


Abbildung 2.5: Darstellung einer relativen Orientierung über ein unabhängiges Bildpaar. Enthalten sind die beiden Bildsysteme mit den fünf unabhängigen Drehwinkelparametern φ_1 , κ_1 , φ_2 , κ_2 und ω_1 bzw. ω_2 . [Luhmann, 2010, S. 277]

ist, wird die x-Achse vom ebenfalls im Projektionszentrum des ersten Bildes gelagerten Modellsystem durch die Basislinie gelegt. Für das zweite Bild ergibt sich eine Translation in der x-Komponente, die als Maßstab mit eins definiert werden kann. Somit ergeben sich als Parameter fünf Drehwinkel, wobei zwischen ω_1 und ω_2 gewählt werden kann. (vgl. [Luhmann, 2010, S. 275], [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 242], [Kraus, 2004, S. 214])

Absolute Orientierung Ergebnis der relativen Orientierung ist ein von Schnitten homologer Strahlen definiertes Modell des Objektes, welches jedoch keinen räumlichen Bezug zu diesem besitzt. Ziel der absoluten Orientierung ist das Modell anhand korrekter Lage, Orientierung und Maßstab in das Objektsystem zu transformieren. Da bereits eine geometrische Ähnlichkeit besteht, wird das Modell im Ganzen über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation durch Verschiebung, Rotation und Streckung eingepasst. Dies ist in Abbildung 2.6 graphisch veranschaulicht.

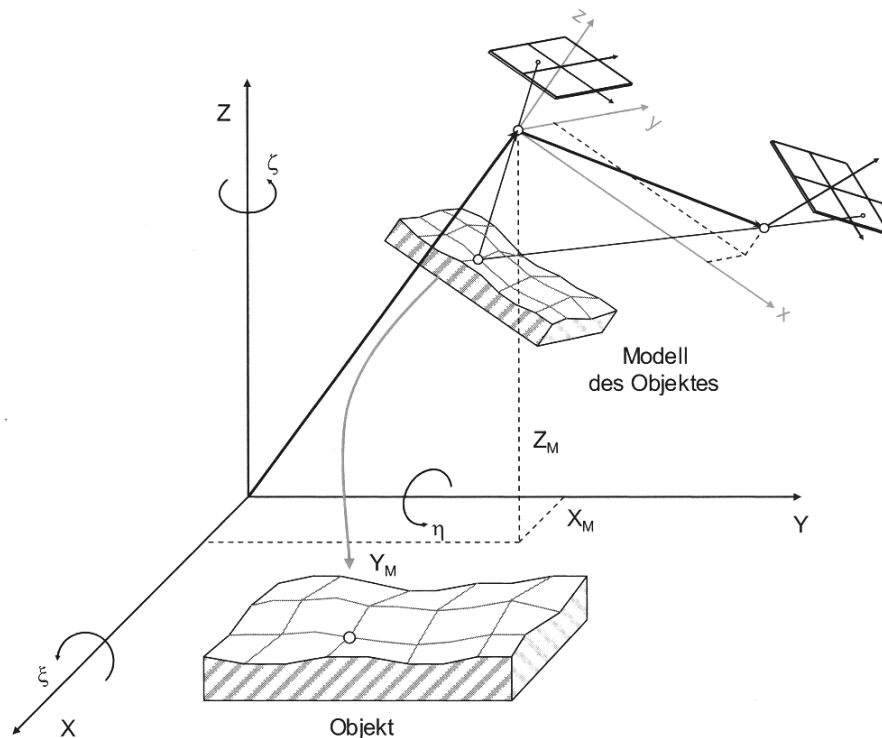


Abbildung 2.6: Darstellung der absoluten Orientierung eines Modellsystems im Objektraum. Dafür relevant sind als Parameter drei Rotationen (ξ , η , ζ), drei Translationen (X_M , Y_M , Z_M) und ein Maßstab (m). [Luhmann, 2010, S. 289]

Zum Ermitteln der genannten sieben unabhängigen Parameter (X_M , Y_M , Z_M , ξ , η , ζ , m) werden mindestens zwei Vollpasspunkte und ein Höhenpasspunkt bzw. zwei Lage- und drei Höhenpasspunkte benötigt. Zu beachten ist, dass die Punkte möglichst gut verteilt sind und die Höhenpasspunkte nicht auf einer Geraden liegen. Je weiter die Punkte voneinander entfernt liegen und je größer somit die aufgespannte Fläche, desto genauer kann die absolute Orientierung bestimmt werden. (vgl. [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 243], [Luhmann, 2010, S. 289 f.])

2.3 Pass-, Verknüpfungs- und Kontrollpunkte

Dieser Abschnitt gilt der Unterscheidung und Beschreibung unterschiedlicher Arten von Punkten.

Passpunkte Zum Nutzen der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Beziehungen zwischen Bildern und Objektraum sind die genannten Orientierungsparameter zu bestimmen. Grundsätzlich werden die dazu nötigen Informationen über den Objektraum aus Passpunkten gewonnen.

Passpunkte sind konkret bestimmbare Objektpunkte, die sowohl im übergeordneten Objektkoordinatensystem bekannt sind, als auch in den Bildern gemessen werden können. Wenn die Objektkoordinaten wie üblich sehr genau bestimmt wurden, können sie optional als fehlerfrei betrachtet werden. [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 159] zufolge können als Passpunkte alle Objektpunkte verwendet werden, die klar definiert und in den Bildern zu identifizieren sind und im Objektsystem bestimmt wurden. Zum Ermitteln der Objektkoordinaten sind aufgrund ihrer Effizienz, auch in entlegenen Gebieten, besonders Global Positioning System (GPS)-Empfänger geeignet. Entsprechend den Gegebenheiten können jedoch auch andere Vermessungstechniken zur Anwendung kommen.

Abhängig vom Gelände und Bildmaßstab sind für den Zweck ausreichend natürliche Punkte vorhanden oder es müssen durch künstliche Markierungen geeignete Punkte geschaffen werden. Als natürliche Passpunkte sind sich von der Umgebung deutlich abhebende Objekte und Strukturen, insbesondere Ecken von zum Beispiel Gebäuden oder Wegkreuzungen, sinnvoll. Künstlich signalisierte Passpunkte ermöglichen allgemein eine höhere Genauigkeit, jedoch ist ein größerer Aufwand nötig, da diese vor dem Bildflug aufgebracht werden müssen. Gängig sind unter anderem farbliche Markierungen auf Straßen oder symmetrisch bedruckte Tafeln. Es ist auf eine gute Unterscheidung zur Umgebung und klare Zuordnung zu achten. In [Kraus, 1996, S. 3] werden bei Schwarzweißfilmen weiße oder gelbe Markierungen und grüner Bewuchs im Hintergrund als besonders geeignet hervorgehoben. Insbesondere bei Straßen und gepflügten Ackerflächen kann eine zusätzliche, zum Signal kontrastreiche, Hintergrundfarbe hilfreich sein.

Generell wird zwischen Voll-, Lage- und Höhenpasspunkten unterschieden. Bei Ersteren stehen alle drei Komponenten der Objektkoordinate zur Verfügung. Entsprechend ist bei Lagepasspunkten nur die zweidimensionale Lage und bei Höhenpasspunkten die Höhe im Bezugssystem bekannt. Um die Identifizierung und Zuordnung der Punkte zu erleichtern und Fehler zu vermeiden, werden Punktübersichten angefertigt, welche die Lage und weitere Informationen enthalten.

Verknüpfungspunkte Zur gegenseitigen Zuordnung und Ausrichtung sich überlappender Bilder ohne absoluten Bezug zum Objektraum werden Verknüpfungspunkte genutzt. Dies sind Objektpunkte, die in mehreren unterschiedlichen Bildern sichtbar sind, womit die Bildkoordinaten als Beobachtungen nutzbar und die Objektkoordinaten unbekannt sind. Aus dem fehlenden absoluten Bezug resultiert im Gegensatz zu Passpunkten ein deutlich geringerer Aufwand, der eine Verwendung großer Mengen ermöglicht. Eine geometrisch steife Verknüpfung der Bilder ist dadurch möglich. Die Kriterien für eine Eignung als Verknüpfungspunkt sind die gleichen wie jene natürlicher Passpunkte.

Verknüpfungspunkte können manuell ausgewählt und gemessen werden. Die leistungsstarken Computer der heutigen Zeit ermöglichen inzwischen die Nutzung von automatisierten Verfahren zum Auswählen und Zuordnen von Verknüpfungspunkten. Mittels Interest-Operatoren werden automatisch markante Punkte in den Bildern ermittelt und anschließend anhand eines Ähnlichkeitsmaßes, beispielsweise der Korrelation von Grauwertmustern, einander zugeordnet. (vgl. [Luhmann, 2010, S. 271])

Kontrollpunkte Kontrollpunkte dienen der Überprüfung des Ergebnisproduktes, zum Beispiel des Orthophotos. Es handelt sich um Punkte, die sowohl klar im Produkt als auch in der Referenz zu identifizieren sind. Aus den Abweichungen der zugehörigen Punkte lassen sich Aussagen über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Produktes und seiner Georeferenzierung ableiten. Leicht vernachlässigt wird dabei, dass die ausgewählten Punkte für verlässliche Aussagen unabhängig von den zum Erstellen des Produkts verwendeten Punkten sein müssen. Insbesondere sollten keine bereits zur Bestimmung der Orientierungen genutzten Passpunkte ein weiteres Mal als Kontrollpunkte genutzt werden. Bei solchen gemessenen Werten handelt es sich lediglich um die Residuen der Ausgleichung und nicht um eine unabhängige Kontrolle.

2.4 Rückwärtsschnitt

Um die äußere Orientierung einzelner Bilder zu bestimmen, wird von [Luhmann, 2010, S. 242 f.] zwischen direkten und indirekten Methoden unterschieden. Die Positionierung unter Einsatz Globaler Navigationssatellitensysteme und die Bestimmung der Orientierung mit Inertialsensoren sind eine direkte Methode. Diese ist in der Regel alleinstehend zu ungenau und kostenintensiv. Alternativ wird daher auf die indirekte Methode des räumlichen Rückwärtsschnittes zurück gegriffen. Das Grundprinzip besteht darin, von bekannten Objektinformationen und der Messung dieser im Bild auf dessen äußere Orientierung zu schließen.

$$\begin{aligned}x' + vx' &= F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, x'_0, c, \Delta x', X, Y, Z) \\y' + vy' &= F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, y'_0, c, \Delta y', X, Y, Z)\end{aligned}\quad (2.4)$$

Der räumliche Rückwärtsschnitt wird in Form einer Ausgleichung basierend auf den Kollinearitätsgleichungen (siehe Formel (2.3)) durchgeführt. Die entsprechenden Beobachtungsgleichungen in Formel (2.4) sind [Luhmann, 2010, S. 243] entnommen. Für die sechs zu bestimmenden Unbekannten ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$) werden, da es sich ursprünglich um ein nicht lineares Problem handelt, Näherungswerte dieser benötigt und mindestens ebenso viele Beobachtungen. Bei $x'_0, y'_0, c, \Delta x'$ und $\Delta y'$ handelt es sich um die Parameter der inneren Orientierung. Die Messung des zugehörigen Bildpunktes eines im Objektraum bekannten Vollpasspunktes liefert zwei Beobachtungen (x', y'). Somit sind mindestens drei in beiden Systemen bekannte Punkte nötig. Erst dann entsteht eine eindeutige Ausrichtung des Strahlenbündels, wie in Abbildung 2.7 veranschaulicht.

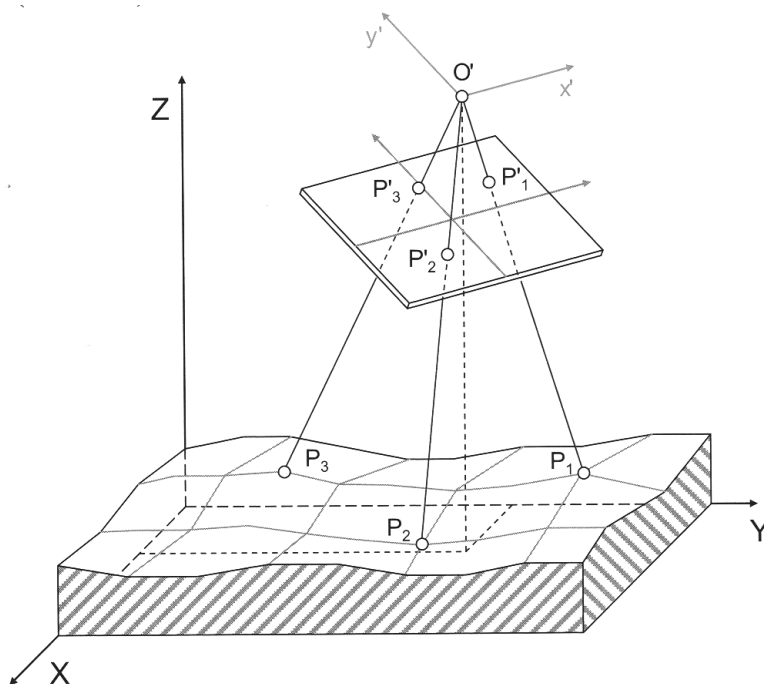


Abbildung 2.7: Veranschaulichung des Prinzips eines Rückwärtsschnittes. Die äußere Orientierung der Bildebene wird im Objektraum von drei Vollpasspunkten fixiert und lässt sich somit eindeutig bestimmen. [Luhmann, 2010, S. 243]

Bei Amateurkameras oder ungenügend kalibrierten Kameras können die zu berechnenden Unbekannten um die innere Orientierung erweitert werden, um diese mitzubestimmen. Daraus resultieren drei zusätzliche Unbekannte bzw. fünf bei einer Schätzung mit zwei Verzeichnungsparametern. Im letzten Fall wären demnach mindestens sechs Vollpasspunkte notwendig. Für gute Ergebnisse sollten die Passpunkte räumlich möglichst weit verteilt liegen.

2.5 Vorwärtsschnitt

Ein räumlicher Vorwärtsschnitt wird genutzt, um die Objektkoordinaten eines in mindestens zwei Bildern sichtbaren Punktes zu ermitteln. Die Anwendung erfolgt somit umgekehrt zum räumlichen Rückwärtsschnitt. Formel (2.5) nach [Luhmann, 2010, S. 344] beschreibt, wie eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate aufbauend auf den Kollinearitätsgleichungen (siehe Formel (2.3)) als Beobachtungsgleichungen durchgeführt wird.

$$\begin{aligned}
 x'_i + vx'_i &= F(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, x'_{0k}, c_k, \Delta x'_k, X_i, Y_i, Z_i) \\
 y'_i + vy'_i &= F(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, y'_{0k}, c_k, \Delta y'_k, X_i, Y_i, Z_i) \\
 x''_i + vx''_i &= F(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, x'_{0k}, c_k, \Delta x'_k, X_i, Y_i, Z_i) \\
 y''_i + vy''_i &= F(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, y'_{0k}, c_k, \Delta y'_k, X_i, Y_i, Z_i)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

mit i : Punktindex, k : Kameraindex

Als Beobachtungen fungieren dabei die gemessenen Bildkoordinaten des Punktes (i) in verschiedenen Bildern. Die inneren und äußeren Orientierungen der verwendeten Bilder müssen dazu bekannt sein. Die aus zwei Bildern in Formel (2.5) ablesbaren vier Beobachtungen reichen schon für eine überbestimmte Lösung der drei unbekanntenen Komponenten (X_i, Y_i, Z_i) der gesuchten Objektkoordinate.

2.6 Bündelblockausgleichung

Mittels einer Bündeltriangulation bzw. Bündelblockausgleichung wird [Kraus, 2004, S. 299] zufolge rechnerisch der direkte Zusammenhang von ausgewählten Bildkoordinaten eines Bildblocks und aus Passpunkten gewonnenen Objektkoordinaten hergestellt. Laut [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 259] besteht der Vorteil, dass die absoluten Orientierungen der verwendeten Bilder und parallel die Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte geschätzt werden. Grundlage dafür sind die Zentralprojektion und die resultierenden Kollinearitätsgleichungen (siehe Formel (2.3)). Diese können, wie im entsprechenden Abschnitt erwähnt, als Beobachtungsgleichungen der Ausgleichung mit Bildkoordinaten als Beobachtungen verwendet werden. Ausgangsdaten sind ein Verband von sich gegenseitig überschneidenden Bildern, in dem benachbarte Bilder in Längsrichtung eine Überdeckung größer als 60 Prozent und quer von mindestens 20 Prozent haben, und genügend Passpunkte mit bekannten Bild- und Objektkoordinaten. Eine Veranschaulichung der grundlegenden räumlichen Anordnung ist in Abbildung 2.8 gegeben.

In [Luhmann, 2010, S. 301 ff.] ist erläutert, dass die Bilder zunächst mittels Verknüpfungspunkten relativ in einem den gesamten Block überspannenden Modell verbunden und zueinander orientiert werden. Anschließend kann mit einer, im Verhältnis zur Einzelorien-

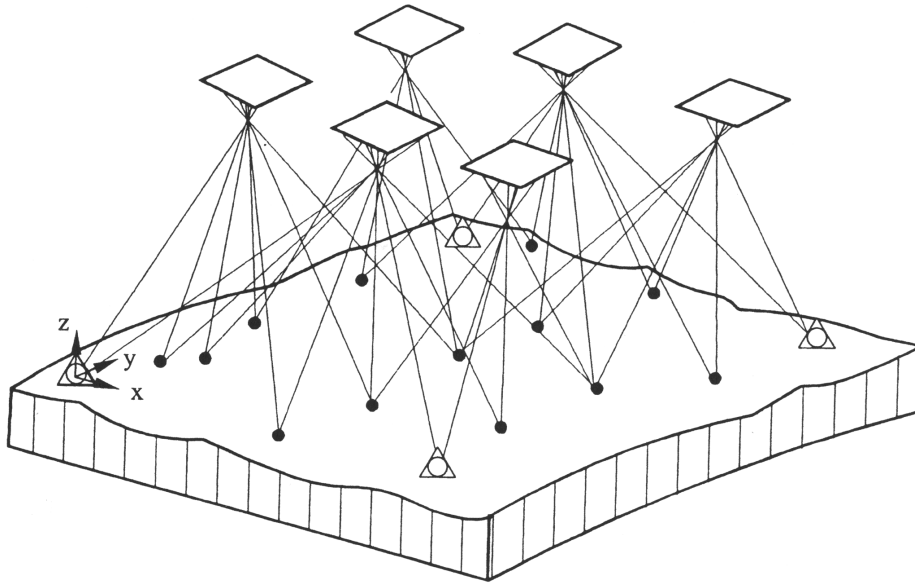


Abbildung 2.8: Modellordnung eines Bündelblocks mit Passpunkten, Bildebenen und zugehörigen Strahlenbündeln im Raum. [Kraus, 2004, S. 299]

tierung jedes der Bilder, geringen Anzahl von Passpunkten das Modell absolut orientiert werden. Durch die vorherige Verknüpfung der Einzelbilder können passpunktarme Bereiche überbrückt werden.

$$\begin{aligned} x'_i + vx'_i &= F(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, x'_{0k}, c_k, \Delta x'_k, X_i, Y_i, Z_i) \\ y'_i + vy'_i &= F(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, y'_{0k}, c_k, \Delta y'_k, X_i, Y_i, Z_i) \end{aligned} \quad (2.6)$$

mit i : Punktindex, j : Bildindex, k : Kameraindex

In einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate, nach Formel (2.6) aus [Luhmann, 2010, S. 307], werden gleichzeitig die Objektkoordinaten der Geländepunkte (X_i, Y_i, Z_i) , die äußeren Orientierungen der Bilder $(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j)$ und optional die inneren Orientierungen der Kameras $(x'_{0k}, y'_{0k}, c_k, \Delta x'_k, \Delta y'_k)$ durch die Optimierung der Schnitte der homologen Bildstrahlen in den zugehörigen Passpunkten iterativ bestimmt. Da es sich um ein nichtlineares Problem handelt, müssen die Beobachtungsgleichungen linearisiert werden und für die unbekannt Parameter Näherungswerte bekannt sein. Das Prinzip ist das des räumlichen Rückwärtsschnittes, jedoch um mehrere Bilder, Kameras und entsprechende Unbekannte erweitert. In das stochastische Modell fließen bekannte Informationen über Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Parameter ein.

Die gemeinsame Berücksichtigung und Optimierung aller genannten Faktoren ist charakteristisch und Grund für die Verbreitung der Methode. Aufgrund der Redundanz und Dichte des von den Strahlenbündeln gebildeten Netzes stellt die Bündelblockausgleichung ein sehr robustes und somit zuverlässiges Verfahren dar. Ein weiterer Vorteil ist, dass dank

der Rechenstärke heutiger Computer neben der Verarbeitung großer Bildverbände auch viele Schritte automatisiert durchgeführt werden können. Aus diesem Grund ist dies das in der Praxis gängige Verfahren.

2.7 Orthophoto

Orthophotos sind laut [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 231] parallel projizierte Bilder mit den geometrischen Eigenschaften einer Karte. Folglich bilden sie im Fall von Luftbildern die Erdoberfläche verzerrungsfrei ab und ermöglichen die Messung von Strecken und Richtungen. Dazu wird die Kameraneigung beseitigt, um ein Senkrechtbild zu erhalten. Voraussetzung dafür sind die Orientierungsparameter der Bilder. Anschließend werden die Lageverschiebungen angesichts eines nicht ebenen Geländes in einer Differenzialentzerrung unter Zuhilfenahme eines digitalen Geländemodells beseitigt. Das Prinzip der differenziellen Entzerrung ist in Abbildung 2.9 skizziert. Dabei wird jedem Pixel (differenziell kleinstes Stück) im entzerrten Orthophoto abhängig von seiner Position ein Grauwert einer Quelle zugeordnet.

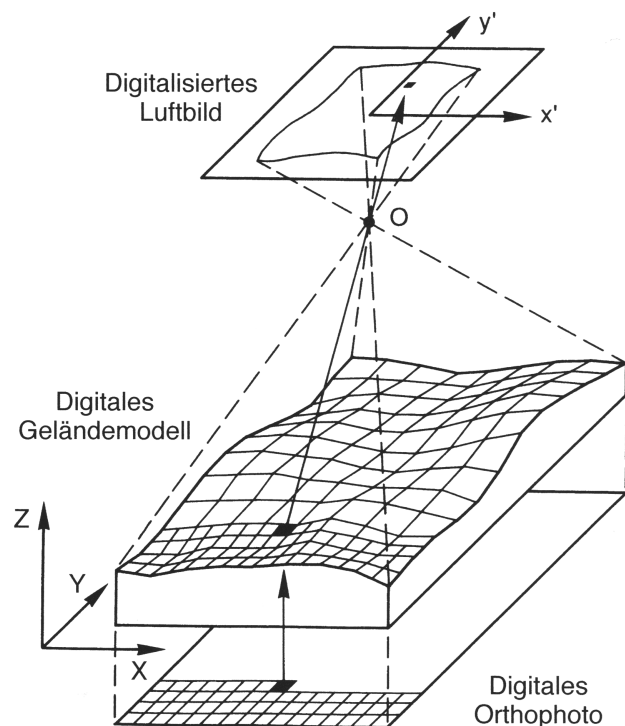


Abbildung 2.9: Darstellung der Abbildung eines Luftbildes unter Einsatz von einem Geländemodell in ein Orthophoto. [Albertz, 2007, S. 153]

Hierzu wird in [Luhmann, 2010, S. 266 ff.] zunächst ein Bereich im Objektraum definiert. Darauf wird in diesem die Rasterweite aufgrund des gewünschten Ausgabemaßstabes

und der Punktdichte im Orthophoto bestimmt. Für die nun vom Raster festgelegten Punkte wird jeweils aus dem Höhenmodell ein zugehöriger Höhenwert per Interpolation der dort umliegenden Werte berechnet. Ergebnis ist eine für jeden Punkt bekannte räumliche Objektkoordinate. Anhand der bekannten inneren und äußeren Orientierungen lassen sich über die Kollinearitätsgleichungen (siehe Formel (2.3)) die zugehörigen Bildkoordinaten ermitteln. An den daraus resultierenden Bildstellen wird durch Interpolation der Werte umliegender Pixel für jeden Rasterpunkt ein zugehöriger Grauwert generiert. Durch Speichern des Rasters und seiner Grauwerte wird ein Orthophoto als Ergebnis erzeugt. Bei verdeckten Bereichen im Bild müssen die nötigen Informationen per Strahlenverfolgung aus einem anderen Bild des Verbandes gewonnen werden.

Das Projizieren der Pixel des Ausgabebildes in die Ursprungsbilder - zur Ermittlung der Grauwerte - wird als indirekte Transformation bezeichnet. Sie wird in der Regel verwendet. Bei der direkten Transformation werden die Grauwerte der Ursprungsbilder in das Ausgabebild transformiert und auf das dortige Raster durch Interpolation angepasst. Bei diesem Verfahren können jedoch im Zielbild Lücken entstehen, welche beseitigt werden müssen.

In [Heipke, 2013, Kapitel 3.6] ist weiterführend beschrieben, wie durch Verwendung eines digitalen Oberflächenmodells statt eines Geländemodells ein sogenanntes „true“ Orthophoto erzeugt werden kann. Ein Geländemodell erfasst die Erdoberfläche ohne Objekte. Ein Oberflächenmodell umschließt zusätzlich beispielsweise Vegetation und Gebäude. Durch das Fehlen der Objekte treten bei der Nutzung eines Geländemodells wegen des Höhenunterschiedes Lagefehler bei der Abbildung dieser auf. Steht ein Oberflächenmodell zur Verfügung, können diese Fehler vermieden werden.

Bei Brücken hingegen treten teils Fehlpositionierungen aufgrund mehrerer Objektebenen auf, weil Höhenmodelle lediglich eine Höhe pro Lagepunkt enthalten. Im Geländemodell ist die Höhe des Tals gespeichert, im Oberflächenmodell die der Brücke. Bei seitlichen Perspektiven können im Bild beide Ebenen erfasst werden, jedoch abhängig des gewählten Modelles nur eine von beiden korrigiert werden. Diese Art von Fehlern können nur manuell mittels Methoden der Bildbearbeitung behoben werden.

2.8 Orthophotomosaik

In [Albertz, 2007, S. 116] wird erklärt, wie durch Mosaikbildung eine Menge einzelner Bilder zu einem Großen vereint werden kann. Dadurch können die Bildinformationen großflächiger Gebiete, zu deren Abdeckung mehrere Einzelbilder nötig sind, in einem Bildmosaik zusammengefasst werden. Ein weiteres Ziel ist die optische Angleichung der Bilder durch radiometrische Anpassungen. In Abbildung 2.10 ist der optische Unterschied

durch eine Anpassung anhand zweier Mosaikverdeutlicht.

In der Vergangenheit wurden zum Erstellen von Bildplänen entzerrte Luftbilder manuell zusammengeklebt. Heute kann dank digitaler Bilddaten und Verarbeitungsmethoden das geometrische Zusammenfügen virtuell und automatisch durchgeführt werden. Die Daten werden dazu in ein einheitliches Bezugssystem transformiert. Es können alle Bilder mithilfe von Passpunkten einzeln entzerrt und anschließend zusammengefügt werden, oder alle Bilder gemeinsam mittels einiger Passpunkte und Verknüpfungspunkten transformiert und aneinander gefügt werden.



Abbildung 2.10: Aus mehreren Orthophotos zusammengesetzte Bildmosaik. Auf der linken Seite sind die Einzelbilder deutlich zu erkennen. Auf der rechten Seite wurde eine radiometrische Anpassung vorgenommen, wodurch ein homogener Gesamteindruck entsteht. [Heipke, 2013, Kapitel 3.6]

Um den Gesamteindruck des Mosaiks zu verbessern, werden anschließend die Helligkeiten, der Kontrast und die Farben der Bilder aufeinander abgestimmt, um Sprünge an den Bildübergängen zu beseitigen. In [Heipke, 2013, Kapitel 3.6] wird darauf eingegangen, wie mit größerem manuellen Aufwand zusätzlich Bildübergänge nach Möglichkeit an topographischen Kanten entlang gelegt werden können. Geeignet sind zum Beispiel Flüsse, Straßen oder Ackergrenzen.

Des Weiteren sollte bei einer Kontrolle bewegten Objekten und zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommenen Bildern besondere Beachtung geschenkt werden. Objekte, welche nicht über alle Bilder des Mosaiks statisch sind, können an Bildübergängen zu fehlerhaften Darstellungen führen.

3 Rahmenbedingungen und Konzept

Dieses Kapitel widmet sich der Konzeptentwicklung zum Erreichen der einleitend gesteckten Ziele sowie deren Kontrolle.

3.1 Verwendete Software

Im Folgenden wird ein Überblick über die zum Verarbeiten der Daten genutzten Software gegeben.

Photoscan Für diese Arbeit wurde die Software Photoscan Professional Edition zum Verarbeiten der Luftbilder und anschließendem Generieren der Orthophotos verwendet. Entwickelt wird sie von Agisoft, einem Unternehmen mit Sitz in St. Petersburg (Russland) und dem Schwerpunkt Computer Vision Technology. Das Programm ist vergleichsweise übersichtlich gehalten, um eine einfache und intuitive Handhabung zu gewährleisten. (vgl. [Agisoft, 2015])

Matlab Bei Matlab handelt es sich um eine auf Ingenieurwissenschaften ausgerichtete Entwicklungsumgebung mit integrierter höherer Programmiersprache zum Durchführen numerischer Berechnungen und graphischer Ergebnisdarstellung. Es steht eine große Menge unterschiedlicher mathematischer Funktionen zur Verfügung. Das Entwicklerunternehmen MathWorks wurde 1984 gegründet und sitzt in den USA. (vgl. [Mathworks, 2015])

QGIS Das Geoinformationssystem QGIS ermöglicht das Darstellen und Auswerten von Geodaten unterschiedlicher Formate und wurde in dieser Arbeit für den Vergleich der erstellten Orthophotos mit der Referenz genutzt. Es ist quelloffen und kostenlos auf der Projektwebseite [QGIS, 2015] erhältlich.

CloudCompare CloudCompare ist eine freie Software, die kostenlos auf der Projektwebseite [Girardeau-Montaut, 2015] heruntergeladen werden kann. Sie wird zur Betrachtung und Verarbeitung von dreidimensionalen Punktwolken und Netzen entwickelt und kann viele entsprechende Dateiformate interpretieren. In dieser Arbeit wurde das Programm zum Vermaschen und Konvertieren des ASTER-Höhenmodells genutzt.

3.2 Generierung von Orthophotos

Im nun folgenden Abschnitt wird ein Konzept beschrieben, um aus den zur Verfügung stehenden Daten, mittels der genannten Verfahren und Software, digitale und referenzierte Orthophotos der historischen Situation zu erzeugen.

3.2.1 Vorbereitung der Bilder und Orientierungen

Aus den bereitgestellten Bilddaten wird exemplarisch ein Bildverband aus dem Jahr 1945 ausgewählt, um einen zeitlich möglichst geringen Abstand zur Bombardierung zu haben. In diesem sind die Krater am deutlichsten zu erkennen. Zum Vergleich wird außerdem ein Bildblock aus dem Jahr 1956 gewählt. Zu den ausgewählten Bildern werden die zugehörigen Näherungswerte der äußeren Orientierung aus der Zusammenstellung entnommen.

3.2.2 Generierung eines vorläufigen Orthophotos

Photoscan ermöglicht eine automatische Ausrichtung der Bilder eines Verbandes zueinander anhand von Näherungsorientierungen und Verknüpfungspunkten. Dies entspricht im Wesentlichen einer relativen Orientierung mit grobem Raumbezug. Um die Suche nach Passpunkten und die anschließende Auswahl zu erleichtern, wird zunächst ein vorläufiges Orthophoto ohne Passpunktinformationen erzeugt.

3.2.3 Vorbereitung und Bestimmung von Passpunkten

Mit QGIS werden unter Nutzung des vorläufigen Orthophotos und dem aktuellen Orthophoto geeignete natürliche Passpunkte ausgewählt. Diese müssen in beiden identifizierbar und möglichst gut über den abgedeckten Bereich verteilt sein. Mit dem aktuellen Orthophoto werden die Lagekoordinaten der Passpunkte bestimmt. Die Höhenkomponente wird dem gegebenen ASTER-Höhenmodell an entsprechender Stelle entnommen.

3.2.4 Erzeugung eines endgültigen Orthophotos

Die Passpunktinformationen werden in Photoscan geladen und die zugehörigen Punkte in den Bildern markiert. Anschließend wird der Ablauf zur Erzeugung eines Orthophotos erneut durchlaufen. Es wird pro Bildverband ein Orthophoto unter Einsatz des im Programmablauf aus den Bildern berechneten Höhenmodells und ein Weiteres mit Einführung des externen ASTER-Höhenmodells generiert.

3.3 Überprüfung

Die im vorherigen Schritt erzeugten digitalen Orthophotos werden nun auf ihre Lagegenauigkeit überprüft. Dazu werden diese in QGIS betrachtet und an ausgewählten Kontrollpunkten, welche nicht den verwendeten Passpunkten entsprechen, mit dem aktuellen Orthophoto als Referenz verglichen. Als Genauigkeitsmaß wird die Differenz der Punkte in Form der euklidischen Distanz genutzt. Des Weiteren werden einige der Bildübergänge im Mosaik genauer auf Sprünge untersucht.

4 Durchführung

Es folgt eine Beschreibung des praktischen Teils dieser Arbeit. Dieser beinhaltet Erläuterungen zur Orthophotoerzeugung, der Ermittlung von Lageabweichungen und deren Vergleich.

4.1 Generierung von Orthophotos

Zunächst wird auf die nötigen Schritte zur Vorbereitung des Bildmaterials und der genäherten Orientierungsdaten eingegangen. Darauf wird die Erstellung eines vorläufigen Orthophotos mit der vorgestellten Software Photoscan, basierend auf den genäherten Orientierungen, erläutert. Schließlich wird das Vorgehen zur Bestimmung von Passpunkten und zur Generierung eines möglichst präzise georeferenzierten Orthophotos beschrieben.

4.1.1 Vorbereitung der Bilder und Orientierungen

Als erster Bildverband wird der des Fluges US 33/2570 vom 23.03.1945 gewählt. Auf den zehn Bildern sind deutliche Krater zu erkennen und keine größeren Störobjekte zu sehen. Als zweiter Verband werden die Bilder der Flüge 181-42-31 und 181-43-31 vom 08.05.1956 ausgewertet. Diese decken einen westlicheren Bereich der Munitionsanstalt ab. Aufgrund des späteren Zeitpunktes sind die Bombenkrater nur schwer und unvollständig auszumachen.

Die gegebenen Bilder haben, mutmaßlich dem Wandel von analog zu digital geschuldet, unterschiedliche Größen innerhalb eines Bildverbandes. Es liegen keine zuverlässigen und vollständigen Informationen zu den Parametern der inneren Orientierungen der verwendeten Kameras vor, daher werden diese zusätzlich als Unbekannte geschätzt. Dabei ist zu beachten, dass vom verwendeten Programm Photoscan verschiedene Bildmaße als von unterschiedlichen Kameras aufgenommene Bilder interpretiert werden. Somit würden für jedes Bild gesonderte Parameter der inneren Orientierung geschätzt werden. Die Zahl der Unbekannten erhöht jedoch die für die Ausgleichung benötigte Zahl von Beobachtungen deutlich. Unabhängig davon ist anzunehmen, dass der Bildverband eines Fluges mit einer einheitlichen Kamera aufgenommen wurde. Daher werden vor dem Import in Photoscan alle Bilder eines Verbandes auf die gleiche Größe beschnitten. Zum Automatisieren dieses Vorgangs wurde ein Matlab-Skript geschrieben, welches alle Bilder rundum auf das kleinste im Verband vorkommende Maß beschneidet. Darüber hinaus werden zur Minimierung der Rechenzeit von Photoscan die Bilder auf 30 Prozent ihrer ursprünglichen Größe verkleinert. Trotz dieser drastischen Reduktion der Bildpunkte sind,

wie in Abbildung 4.1 veranschaulicht, die wesentlichen Strukturen weiterhin zu erkennen. Mit Bildern in Originalgröße dauert der Berechnungsablauf eines Bildverbandes bei niedrigen Genauigkeitseinstellungen mehrere Stunden und bei höheren bricht die Berechnung aufgrund eines Speicherüberlaufs ab. Die auf den Bildern vorhandenen Rahmenmarken werden nicht berücksichtigt, da eine Veränderung der Bildgeometrie durch das Scannen beim Digitalisieren nicht ausgeschlossen werden kann und außerdem keine Informationen über die Sollkoordinaten vorliegen. Die Parameter der inneren Orientierung werden in der späteren Ausgleichung in Photoscan mitgeschätzt.

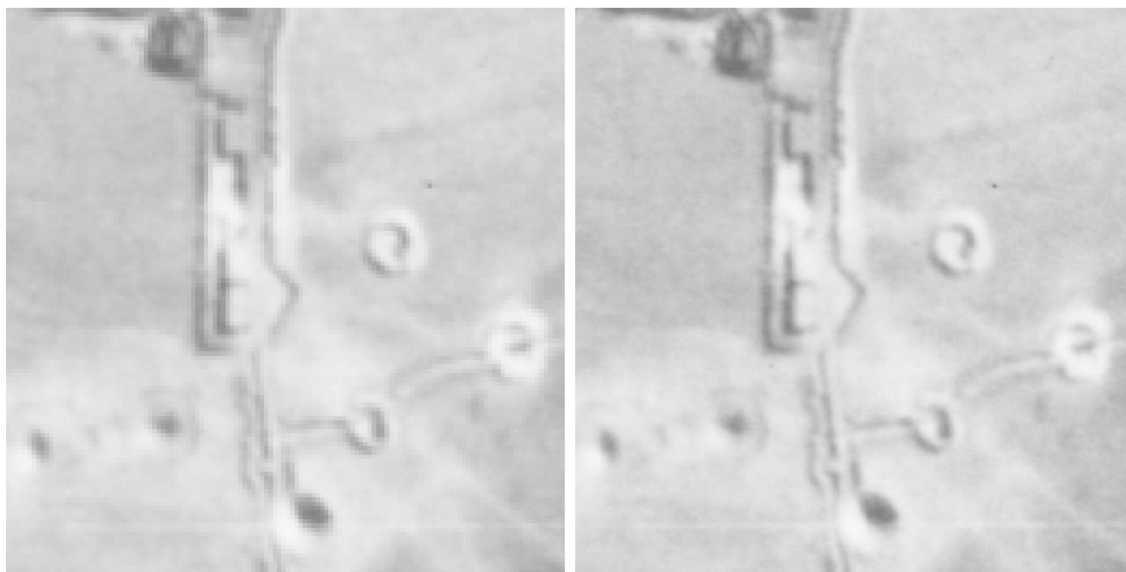


Abbildung 4.1: Beispielhafte Gegenüberstellung des gleichen Bildausschnittes von einem auf 30 Prozent der vollen Auflösung verkleinerten Bild (links) und dem originalen Bild (rechts).

Zu den Bildern ist eine Tabelle mit Näherungswerten der äußeren Orientierungen gegeben. Um die Importfunktion von Photoscan nutzen zu können, müssen der Tabelle die relevanten Daten entnommen und in einer Textdatei zusammengefasst werden. Dazu zählen der Bildname, die Lage und die Höhe des Projektionszentrums über Grund. Die Lagekoordinaten der Bilder eines Blocks sind teilweise in unterschiedlichen Streifen des Gauß-Krüger-Systems gegeben. Da die Orientierungen der Kameras in einem einheitlichen Koordinatensystem anzugeben sind, werden die im DHDN / Gauß-Krüger Zone 2 und 3 System (European Petroleum Survey Group (EPSG) Code 31466 und 31467) vorliegenden Daten alle in einen Streifen transformiert. In diesem Fall bietet sich der zweite Streifen an, weil der Großteil bereits in diesem vorliegt. Für die Neigungswinkel sind keine Werte bekannt, da die Ausrichtung und Neigung des Flugzeugs zum Aufnahmezeitpunkt nicht gegeben sind. Sie werden daher als Näherung mit Null angesetzt.

4.1.2 Generierung eines vorläufigen Orthophotos

Das Durchlaufen des Programmablaufs von Photoscan ohne Passpunkte hat den Vorteil, dass bereits ein grob referenziertes Orthophoto beim Auswählen der Passpunkte verfügbar ist und die Suche nach diesen erleichtert. Des Weiteren ist beim späteren Setzen der Passpunktmarkierungen in Photoscan die ungefähre relative Orientierung der Bilder bereits bekannt. Dadurch können die Markierungen vom Programm automatisch grob positioniert und somit anschließend schneller manuell gesetzt werden.

Zunächst wird für den Bildverband ein neues Projekt in Photoscan erstellt und die vorbereiteten Bilder und Näherungsorientierungen werden importiert. Außerdem werden die Referenz Einstellungen an die schlechte Genauigkeit der Daten angepasst. Die für diese Arbeit verwendeten Werte sind beispielhaft in Anhang A aufgelistet.

In den Randbereichen der Bilder sind einige Reste von Rahmenmarken, Beschriftungen und Klebestreifen zu finden. Da diese im Weiteren zu Fehlern bei der Bildzuordnung führen können, werden die betroffenen Bereiche manuell maskiert. Dadurch werden sie in den Folgeschritten von Photoscan ignoriert. Es gibt die Möglichkeit, die erstellten Masken zu exportieren, wodurch bei weiteren Durchläufen (mit anderen Einstellungen oder für das finale Orthophoto) mit gleichen Bildern die Maske importiert werden kann.

Im Berechnungsablauf des Programms wird als nächstes die automatische relative Orientierung der Bilder gestartet. Bei den Parametern ist auf eine hohe Grenze der Verknüpfungspunkte und auf die Berücksichtigung der Masken zu achten. Die verwendeten Parameterwerte sind ebenfalls in Anhang A aufgeführt. Im Anschluss sind in der Modellansicht (siehe Abbildung 4.2) des Programms die grobe Oberflächenform und die Anordnung der Bildebenen zu sehen, deren Positionen und Orientierungen Flugstreifen entsprechen sollten. Bei eindeutig unpassender Konfiguration sollte eine erneute Berechnung mit geänderten Parametern in Betracht gezogen werden.

Durch die bekannte relative Orientierung der Bilder können aus den Schnitten der Bildstrahlen mittels räumlicher Vorwärtsschnitte die Oberflächenpunkte berechnet werden. Das Ergebnis ist eine Punktwolke der Modelloberfläche. Aus der Punktwolke wird ein vermaschtes Höhenmodell berechnet, sodass jedem Punkt auf der Objektoberfläche eine Modellhöhe zugeordnet werden kann. Im folgenden Schritt werden auf die berechnete Oberfläche die zugehörigen Grauwert-informationen der Bilder projiziert und somit das Netz texturiert. Hierdurch werden die Farbinformationen der Einzelbilder zu einem Mosaik vereint. An dieser Stelle gibt es die Möglichkeit einer automatischen radiometrischen Anpassung. Schließlich wird das texturierte Höhenmodell orthogonal in die Grundrissebene projiziert, um ein Orthophoto zu erhalten. Über die Näherungswerte der Projektionszentren georeferenziert, wird dieses als GeoTIF-Bild exportiert.

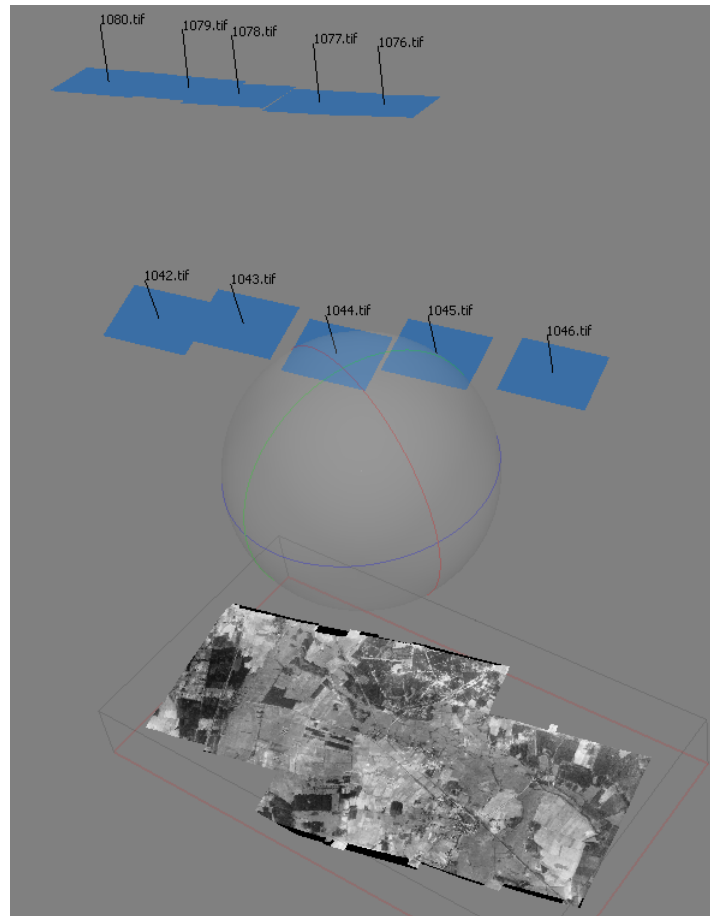


Abbildung 4.2: Räumliche Modellansicht in Photoscan mit Position und Ausrichtung der Bildebenen.

4.1.3 Vorbereitung und Bestimmung von Passpunkten

Um das Modell absolut zu orientieren und somit den Geobezug der endgültigen Orthophotos zum übergeordneten Landeskoordinatensystem zu erreichen, werden über das Gebiet verteilte Vollpasspunkte verwendet. Da keine künstlich markierten Punkte vorliegen, werden markante natürliche Punkte der Topographie genutzt. Es wird unter anderem nach Kreuzungen von Wegen, Straßen und Bächen gesucht, welche möglichst unverändert im aktuellen digitalen Orthophoto zu finden sind. Nur anhand des Bildmaterials können Veränderungen jedoch nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden und sind daher einzukalkulieren. Des Weiteren ist es durch die große Zeitspanne von über 50 Jahren schwierig, genügend unveränderte Punkte zu identifizieren.

Mit QGIS ist es möglich die Lagekoordinaten in einem gewünschten Koordinatensystem für die ausgewählten Punkte in unterschiedlichen Layern zu bestimmen. Das vorläufige Orthophoto lässt sich mit dem Aktuellen vergleichen und geeignete Passpunkte auswählen. Nach dem Import des ASTER-Höhenrasters lassen sich zu den Lagekoordinaten zusätzlich

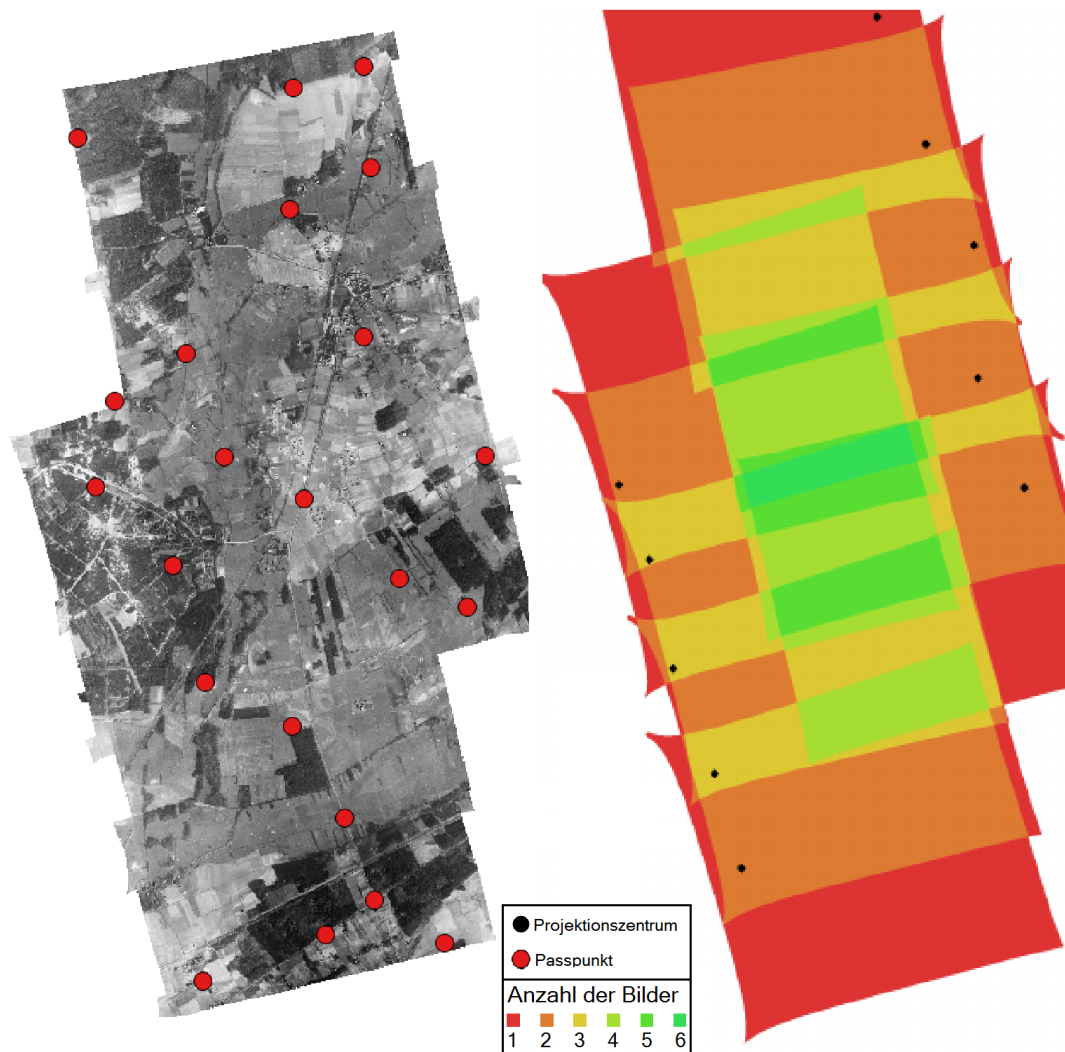


Abbildung 4.3: Auf der linken Seite eine Darstellung der verwendeten Passpunkte für den Bildverband von Flug US 33/2570 mit dem entsprechenden Orthophoto als Hintergrund. Rechts ist eine Grafik zum Veranschaulichen der Verteilung der Projektionszentren und Bildüberlappungen.

die Höhen der Punkte ermitteln. Die bestimmten Passpunkte werden anschließend als Textdatei, ähnlich den Näherungsorientierungen, exportiert. Dies ermöglicht einen anschließenden Import der Werte als Passpunktkoordinaten in Photoscan. Um einen Eindruck über die Anzahl und Verteilung der genutzten Passpunkte zu erhalten, wurden diese in den Abbildungen 4.3 und 4.4 auf den historischen Orthophotos abgebildet. Die Orthophotos zeigen nur die von mehreren Bildern abgedeckten Bereiche. Die abseits liegenden Passpunkte sind folglich nur in einzelnen Bildern sichtbar. Des Weiteren ist in Abbildung 4.3 auf der rechten Seite exemplarisch die Verteilung der Bilder und deren Projektionszentren über das Gebiet gezeigt.

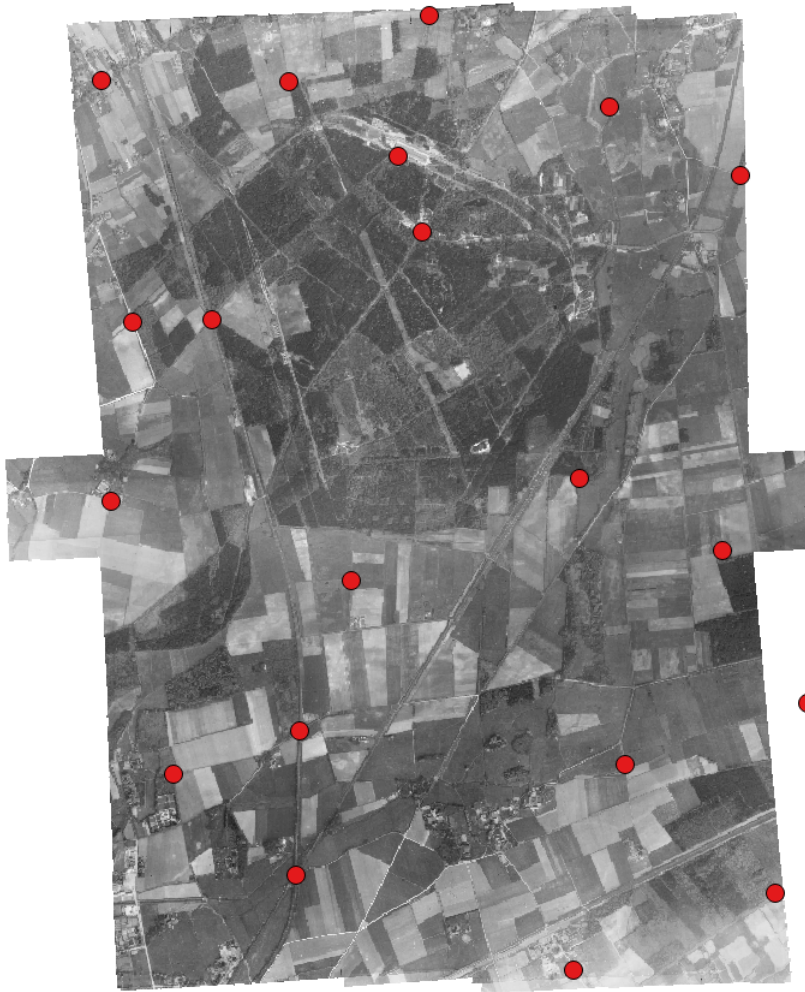


Abbildung 4.4: Darstellung der verwendeten Passpunkte für die Bildverbände 181-42-31 und 181-43-31 mit dem entsprechenden Orthophoto als Hintergrund.

4.1.4 Erzeugung eines endgültigen Orthophotos

Es bietet sich an, das von der Erzeugung des vorläufigen Orthophotos bestehende Projekt fortzuführen, da die Daten schon geladen und die Bilder bereits relativ orientiert sind. Durch Rückprojektion werden dadurch im Folgenden die Passpunkte bereits grob positioniert und die händische Platzierung dieser beschleunigt. Auch die Bildmasken können beibehalten werden.

Nun wird die im letzten Abschnitt vorbereitete Datei mit Passpunktkoordinaten in Photoscan geladen und die zugehörigen Markierungen werden in den entsprechenden Bildern manuell gesetzt. Daraufhin wird der Programmablauf analog zur Generierung eines vorläufigen Orthophotos durchlaufen.

Die Bilder werden erneut automatisch ausgerichtet. Es ist ebenfalls auf die Grenze der Verknüpfungspunkte und die Verwendung der Masken zu achten, wie bei den genutzten Einstellungen im Anhang A. Anschließend sollte die Lage der Projektionszentren in der

räumlichen Modellansicht auf Schlüssigkeit überprüft und im Zweifel die relative Orientierung mit geänderten Parametern wiederholt werden. Aus den neuen Orientierungen wird eine entsprechende Punktwolke erzeugt und daraus ein vermaschtes Modell berechnet. Beim darauffolgenden Texturieren besteht die Möglichkeit einer automatischen radiometrischen Anpassung. Beim Export als Orthophoto wird die Textur, basierend auf dem Modell, parallel projiziert. Das Ergebnis ist ein anhand der Passpunkte georeferenziertes Orthophoto, jedoch ohne Einführung eines externen Höhenmodells.

Für ein Orthophoto unter Berücksichtigung der ASTER-Höhendaten müssen diese zunächst vorbereitet werden. Das ASTER-Höhenmodell liegt in Rasterform als TIF-Bild vor, wird für den Import in Photoscan jedoch als vermaschtes Modell benötigt. Daher wird es zur Konvertierung zunächst in CloudCompare geöffnet. Nach dem Definieren der Pixelgrauwerte als Höhenkomponente des Modells wird dort eine Delaunay-Triangulation durchgeführt. Anschließend wird das nun vermaschte räumliche Modell in einem von beiden Programmen unterstützten Format exportiert. In diesem Fall wurde das Polygon Dateiformat PLY genutzt.

In diesem Format wird das Höhenmodell in das bestehende Photoscanprojekt importiert und die letzten Berechnungsschritte wiederholt. Das externe Höhenmodell wird anhand der bereits orientierten Bilder texturiert, um darauf als Orthoprojektion exportiert zu werden. Das Ergebnis ist ein georeferenziertes Orthophoto, projiziert auf Basis des ASTER-Höhenmodells.

4.2 Überprüfung

Nach der Generierung der Orthophotos gilt es die Referenzierung dieser zu überprüfen. Auf diese Weise sollen grobe Fehler aufgedeckt und die Genauigkeit des Geobezugs abgeschätzt werden können.

4.2.1 Abweichung zur Referenz

Als numerisches Genauigkeitsmaß werden die Lagekoordinaten korrespondierender Punkte im aktuellen Orthophoto und im zu überprüfenden historischen Orthophoto mit QGIS bestimmt und die Differenz dieser berechnet. Durch Vergleich der minimalen, maximalen Werte und dem Median der euklidischen Distanz lässt sich die Genauigkeit des Orthophotos einordnen und untereinander in Relation setzen. Die Visualisierung der überhöhten Differenzen gestattet zusätzlich eine übersichtliche und optische Vergleichsmöglichkeit. Auf diese Weise lassen sich unter anderem systematische Fehler aufgrund ungeeigneter Höhenmodelle aufdecken.

In Abbildung 4.5 sind die Abweichungen der beiden generierten Orthophotos des Flu-ges US 33/2570 zum Referenzorthophoto graphisch dargestellt. Anhand der roten Punkte, welche den gewählten Kontrollpunkten entsprechen, lässt sich deren Verteilung über das Gebiet erkennen. Mit fünfzigfacher Überhöhung sind in rot die Abweichungen des Orthophotos ohne externes Höhenmodell abgebildet und zum Vergleich in grün die Abweichungen des Orthophotos mit ASTER-Höhendaten. Auf den ersten Blick fallen keine globalen Systematiken bei der Richtung und dem Betrag der Abweichungen auf. Dies deutet auf keine groben Fehler, wie beispielsweise unterschiedliche Koordinatensysteme, beim Zusammenpassen der unterschiedlichen Daten hin. Es lässt sich lediglich beobachten, dass benachbarte Kontrollpunkte ähnliche Differenzen aufweisen. Des Weiteren sind die Abweichungen des Orthophotos mit externen Höhendaten tendenziell die größeren.

Die Differenzen an den Kontrollpunkten zwischen der Referenz und den erzeugten Orthophotos der Flüge 181-42-31 und 181-43-31 sind in Abbildung 4.6 zu betrachten. Die roten Punkte stellen analog zu Abbildung 4.5 die genutzten Kontrollpunkte dar und die Abweichungen der ohne und mit externen Höhen generierten Photos sind überhöht in rot und grün aufgetragen. Im Zentrum des Orthophotos wurden aufgrund zu starker Änderung des Geländes keine übereinstimmenden und für Kontrollpunkte geeigneten Stellen gefunden. Ansonsten sind lediglich einige lokale Systematiken, jedoch keine auffälligen globalen, auszumachen. Beim Vergleich der beiden Orthophotoversionen fällt auf, dass im Gegensatz zum vorherigen Pärchen vorwiegend die Abweichungen des Orthophotos ohne externes Höhenmodell größer sind.

In Tabelle 4.1 sind die minimalen, maximale Werte und die Medianwerte der Differenzen an den Kontrollpunkten zwischen den generierten Orthophotos und dem Referenzbild zusammengestellt. Der Median wurde aufgrund seiner Ausreißerresistenz im Verhältnis zum einfachen Mittelwert gewählt.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der minimalen, maximalen Werte und dem Median der euklidischen Abweichungen der Kontrollpunkte zwischen den erzeugten Orthophotos und der Referenz.

Bildverband	Minimum [m]	Maximum [m]	Median [m]
US 33/2570	2,70	10,12	5,24
US 33/2570 mit ASTER	1,84	11,62	5,53
181-42-31 und 181-43-31	0,30	15,20	5,00
181-42/43-31 mit ASTER	0,53	10,88	3,99

Beim Vergleich der Werte von beiden US 33/2570 Orthophotos werden die Beobachtungen aus Abbildung 4.5 bestätigt, in der die Differenzen des Orthophotos ohne externe Höhenwerte insgesamt etwas geringer sind. Der Median liegt bei 5,24 m, wohingegen der des Bildes mit ASTER-Daten 5,53 m beträgt. Die Werte der Flüge 181-42-31 und

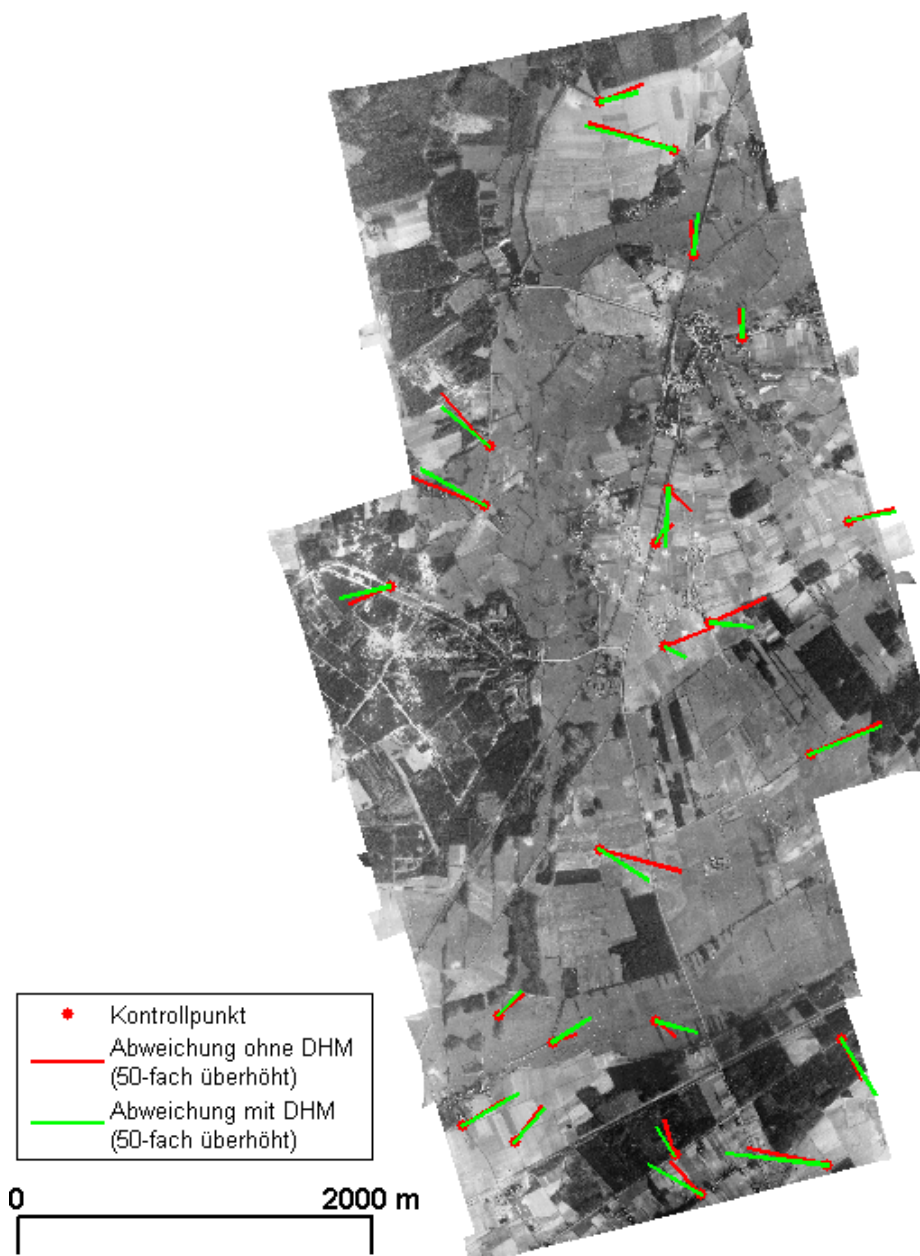


Abbildung 4.5: Mit Matlab erstellter Plot zur grafischen Visualisierung der Abweichungen der aus historischen Luftbildern (Flug US 33/2570) generierten Orthophotos und Referenzorthophotos. Die Abweichungen an den Kontrollpunkten sind mit 50-facher Überhöhung dargestellt.

181-43-31 stützen ebenfalls die in der zugehörigen Abbildung 4.6 gemachte Beobachtung. Der Median der Abweichungen des Orthophotos mit ASTER-Modell ist mit 3,99 m deutlich kleiner als die 5,00 m des Photos ohne externe Höhen.

Oberflächlich betrachtet bewegt sich der Abweichungsmedian aller erzeugten Orthophotos im Bereich von fünf Metern. Der Median der Differenzen des Orthophotos der Flüge 181-42-31 und 181-43-31 mit ASTER-Höhenmodell ist mit 3,99 m insgesamt am gerings-

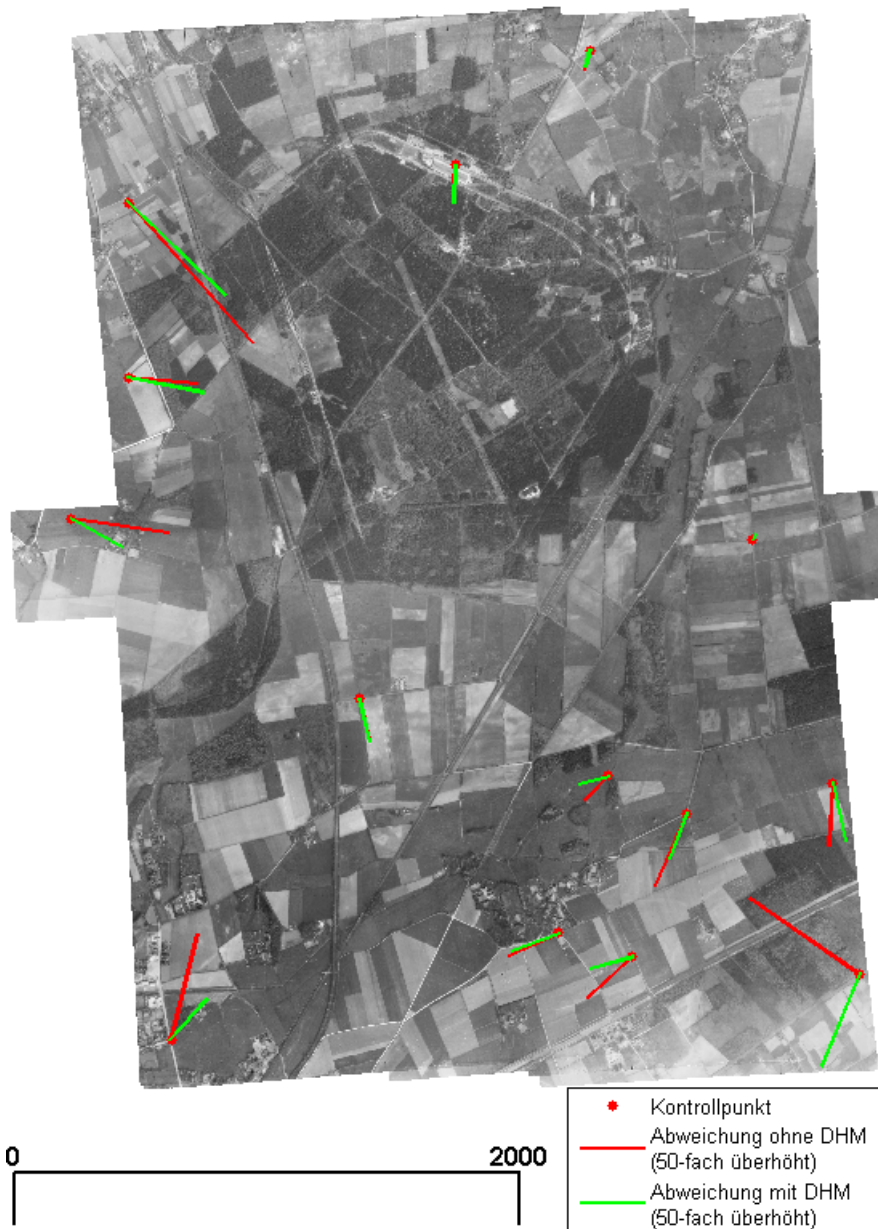


Abbildung 4.6: Mit Matlab erstellter Plot zur grafischen Visualisierung der Abweichungen der aus historischen Luftbildern (Flüge 181-42-31 und 181-43-31) generierten Orthophotos und Referenzorthophotos. Die Abweichungen an den Kontrollpunkten sind mit 50-facher Überhöhung dargestellt.

ten und demnach das am genauesten georeferenzierte Orthophoto. Dies lässt sich unter anderem auf die kompaktere Form des Bildverbandes und die dadurch gute Überdeckung der Einzelbilder zurückführen.

4.2.2 Optische Kontrolle

Zusätzlich werden die finalen Orthophotos einer optischen Kontrolle unterzogen. Anhand des Verlaufs von zum Beispiel Straßen und Wegen an Schnittstellen mit Bildgrenzen innerhalb des Mosaiks, lässt sich auf Fehler in der Positionierung schließen. Sprünge und Verschiebungen von Objekten an Bildübergängen deuten an dieser Stelle auf unpassende Höhendaten oder fehlerhafte Orientierungen der Bilder hin. Eine harmonische und plausible Objektgeometrie im Orthophoto gibt allerdings keinen Hinweis auf eine korrekte absolute Positionierung. Es handelt sich lediglich um eine Überprüfung auf innere Widersprüche und somit eine relative Genauigkeit. Um die Erkennung von Bildübergängen innerhalb des Orthophotomosaiks zu erleichtern, wurde bei den im Folgenden verwendeten Orthophotos keine radiometrische Anpassung durchgeführt.

Zum Vergleich ist in Abbildung 4.7 der gleiche Ausschnitt der Orthophotos von Flug US 33/2570 gegenübergestellt. Darin kreuzt die Grenze zwischen zwei Bildern des Mosaiks eine Straße. Im Ausschnitt des Orthophotos ohne Verwendung eines externen Höhenmodells (oben links) ist der Übergang zwischen den Bildern unauffällig. Im Orthophoto mit externen Höhendaten (oben rechts) hingegen ist, insbesondere in der Straße, ein deutlicher Sprung zu erkennen, welcher auf eine fehlerhafte Abbildung hinweist. Das genutzte Höhenmodell (unten rechts) weist im betreffenden Bereich allerdings keine Auffälligkeiten auf. Im Orthophoto (unten links), das auf Basis einer Ebene als Höhenmodell erzeugt wurde, tritt an gleicher Stelle ebenfalls ein Versatz auf. Zusammengefasst lässt sich daraus auf eine ungenau hergestellte innere Orientierung schließen. Geometrische Ungenauigkeiten in den Randbereichen von Bildern sind ein typischer Effekt von nicht korrekt erfassten radialen Verzeichnungen. Aus der inkorrekt hergestellten Bildgeometrie resultiert ein entsprechend fehlerhaft generiertes Höhenmodell, welches jedoch die Projektion optisch verbessert.

Ein anderer Ausschnitt der gleichen Orthophotos ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Im mittleren Ausschnitt, der aus dem Orthophoto ohne importierte Höhen stammt, sind insbesondere im Waldgebiet auf der linken Seite Schlieren zu sehen, welche durch einen Versatz der Geometrie entstanden sind. Auch auf den Acker- und Wasserflächen im betreffenden Ausschnitt sind fehlerhaft abgebildete Bereiche auszumachen, die sich als Flecken äußern. Auf den Originalbildern sind in den beschriebenen Bereichen keine vergleichbaren Auffälligkeiten auszumachen, wodurch Verunreinigungen als Ursache ausgeschlossen werden können. Im Orthophoto mit externem Höhenraster (oberer Ausschnitt) treten die Fehler hingegen nicht auf. Im aus den Bildern erzeugten Höhenmodell (Abbildung 4.8 unten) sind unnatürliche Sprünge und Unregelmäßigkeiten an den Stellen der Abbildungsfehler zu beobachten. Flächenhafte Höhenfehler fallen im späteren Orthophoto kaum auf. Die aus den sich sprunghaft ändernden Werten im erzeugten Höhenmodell resultieren lokale Lageverschiebungen jedoch äußern sich in den beschriebenen optisch auffallenden Flecken.



Abbildung 4.7: Gegenübergestellt wird ein Bildübergang von Flug US 33/2570. Zu sehen ist der gleiche Bildausschnitt des Orthophotos ohne externes Höhenmodell (oben links), mit ASTER-Modell (oben rechts), mit einer Ebene als Höhenmodell (unten links) und das ASTER-Modell des Bereichs als Graustufengrafik (unten rechts).

Ein Beispiel für einen guten Bildübergang innerhalb eines Orthophotomosaiks ist anhand eines Ausschnittes des Orthophotos der Flüge 181-42-31 und 181-43-31 mit ASTER-Höhen in Abbildung 4.9 gegeben. Die Bildgrenze ist durch die radiometrischen Unterschiede zwischen den Bildern zu erkennen und verläuft horizontal durch den Ausschnitt. An den rot umkreisten Stellen kreuzt die Grenzlinie eine Straße und einen Weg. Die Bilder sind gut zueinander orientiert, da dort keine Verschiebungen oder geometrischen Sprünge zu erkennen sind.



Abbildung 4.8: Vergleich von Bildausschnitten der Orthophotos des Fluges US 33/2570 mit ASTER-Modell (oben), ohne externes Höhenmodell (mittig) und des aus Bildern berechneten Höhenmodells (unten) als Graustufen.

In Abbildung 4.10 sind beispielhaft zwei weitere Ausschnitte von Orthophotomosaiken der im vorherigen Absatz genannten Flüge gegeben. Zu sehen ist der Bereich einer Wegkreuzung. Im mittleren Ausschnitt, welcher aus dem Orthophoto ohne externe Höhendaten stammt, verläuft ein Weg im Gegensatz zu den anderen nicht wie erwartet gleichförmig.



Abbildung 4.9: Bildausschnitt vom Orthophoto der Flüge 181-42-31 und 181-43-31 mit ASTER-Modell als Beispiel eines gelungenen Bildübergangs.

Der Verlauf ist unnatürlich und unregelmäßig. Im oberen Ausschnitt, welcher aus dem Orthophoto mit externen Höhen stammt, sind die beschriebenen Auffälligkeiten nicht zu beobachten. Der im vorherigen Ausschnitt markante Wegabschnitt verläuft wie die umliegenden Wege und wurde offensichtlich geometrisch korrekt abgebildet. Das der ersten Projektion zugrundeliegende, aus dem Bildmaterial berechnete, Höhenmodell scheint an erwähnter Stelle fehlerhaft zu sein. Die externen Höhendaten hingegen geben das Gelände offensichtlich angemessen wieder und führen zu einer schlüssigen Abbildung der Situation.

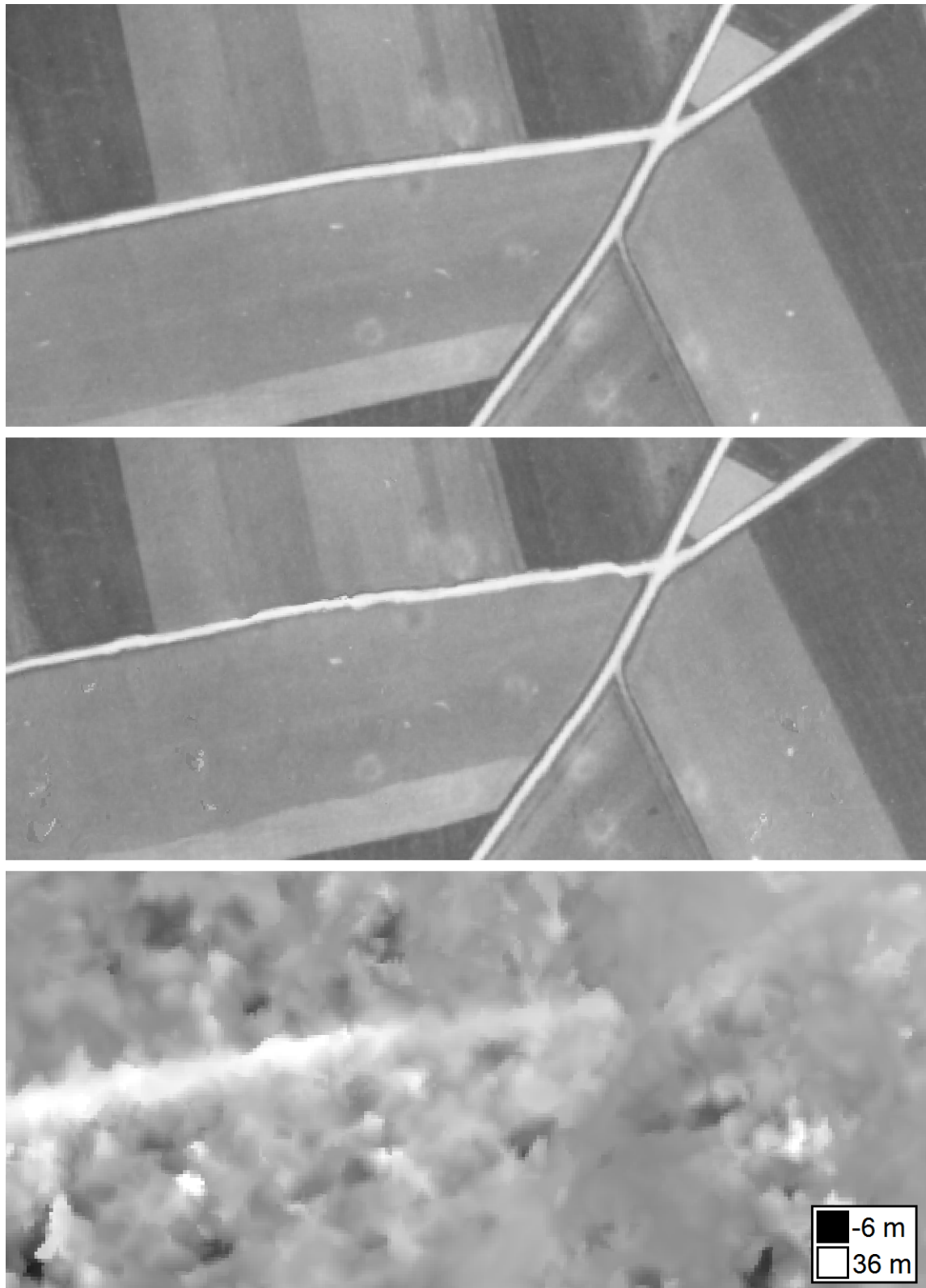


Abbildung 4.10: Ausschnitte von Orthophotos der Flüge 181-42-31 und 181-43-31 mit ASTER-Modell (oben) und ohne zusätzliche Höhendaten (mittig). Anhand der Wegverläufe lassen sich Fehler in der Abbildung erkennen. Unten ist das aus den Bildern erzeugte Höhenmodell als Graustufenbild zu sehen.

5 Fazit und Ausblick

Die Betrachtung der Bilder eines Fluges als Gesamtheit und entsprechender Passpunktsuche in einem bereits relativ orientierten Orthophoto bringen gewisse Vorteile mit sich. Infolge der Nutzung des vorläufigen Orthophotos als Übersicht wird die Passpunktsuche zum einen erleichtert, zum anderen ermöglicht die Bündelblockausgleichung eine reduzierte absolute Passpunktzahl und deren flexiblere Verteilung. Es müssen nicht zwingend mehrere Passpunkte pro Bild verfügbar sein. Angesichts der auf Verknüpfungspunkten basierenden Verbindung der Bilder untereinander können Bereiche ohne Passpunkte überbrückt werden. In dieser Arbeit wurde so das Gelände der Munitionsanstalt überbrückt. Angesichts starker topographischer Veränderungen im Bereich der Anstalt durch flächendeckende Baumaßnahmen war es dort nicht möglich geeignete Passpunkte zu finden.

Trotz der erschwerenden Gegebenheiten, bedingt durch die Qualität der Daten und den großen Zeitabstand, wurden akzeptable Ergebnisse erreicht. Deren Abweichungen liegen mit einem Median von ca. fünf Metern zwar über den in [AhKmr, 2014] geforderten drei Metern, jedoch in einem nutzbaren Bereich. Bei der optischen Kontrolle der Bildmosaik hat sich gezeigt, dass nicht erfasste Verzeichnungen der inneren Orientierungen zu unharmonischen Bildübergängen führen können. Ferner treten in den aus den Bildern erzeugten Höhenmodellen in einigen Bereichen fälschlicher Weise ruckartige Höhenänderungen auf, die zu inhomogenen Abbildungen führen. Dies kann durch Nutzung eines externen Höhenmodells vermieden werden. Zusammenfassend sind als Ursachen für die Abweichungen die fehlenden Kenntnisse über die innere Orientierung der genutzten Kameras, der Mangel präziser Passpunkte und das geometrisch verfälschte Bildmaterial zu nennen.

Die Orientierung der Bilder und somit die Qualität des Ergebnisses basieren zu einem großen Teil auf der Qualität und Zuverlässigkeit der verwendeten Passpunkte. Das verfügbare digitale Orthophoto hat mit 70 Zentimetern für diese Aufgabe eine recht grobe Auflösung und wurde zu einem Zeitpunkt aufgenommen, zu dem große Teile der Vegetation grün war. Insbesondere durch vollständig belaubte Bäume wird die Zahl gut sichtbarer und somit geeigneter Passpunkte deutlich eingeschränkt. Wenn vorhanden, sollte daher ein höher aufgelöstes und in den Wintermonaten aufgenommenes digitales Orthophoto als aktuelle Referenz genutzt werden.

In dieser Arbeit wurden die tatsächlichen Maße der Luftbilder vernachlässigt und die Randbereiche lediglich maskiert. Für eine genauere Rekonstruktion der inneren Orientierung wäre es denkbar, die auf den Bildern enthaltenen Ränder vollständig zu beseitigen. Durch das individuelle Beschneiden der digitalen Bilder auf die Maße der ursprünglichen Luftbilder könnte die Berechnung der inneren Orientierung verbessert werden. Zusätzlich

wäre es denkbar trotz unbekannter Sollkoordinaten der Rahmenmarken den Bildhauptpunkt mittels dieser näherungsweise herzustellen.

Ist als Ergebnis ein höher aufgelöstes Orthophoto gewünscht, besteht die Möglichkeit die zur Generierung genutzten Bilder gar nicht oder weniger als in dieser Arbeit zu komprimieren. Die Folge wäre allerdings eine deutlich längere Berechnungszeit und die Notwendigkeit leistungsfähigerer Computer.

Literaturverzeichnis

- [AhKmr 2014] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.) ; BUNDESMINISTERIUM DER VERTEIDIGUNG (Hrsg.): *Arbeitshilfen Kampfmittelräumung*. Web. 2014. – URL <http://www.arbeitshilfen-kampfmittelraeumung.de>. – Zugriffsdatum: 05.10.2015
- [Agisoft 2015] AGISOFT (Hrsg.): *Agisoft*. Web. 2015. – URL <http://www.agisoft.com/about/>. – Zugriffsdatum: 08.07.2015
- [Mathworks 2015] MATHWORKS (Hrsg.): *Matlab*. Web. 2015. – URL <http://de.mathworks.com/products/matlab/>. – Zugriffsdatum: 05.10.2015
- [QGIS 2015] QGIS (Hrsg.): *QGIS*. Web. 2015. – URL <http://www.qgis.org/de/site/index.html>. – Zugriffsdatum: 05.10.2015
- [Albertz 2007] ALBERTZ, Jörg: *Einführung in die Fernerkundung*. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2007. – 3., aktualisierte und erweiterte Auflage
- [Albertz und Wiggenhagen 2009] ALBERTZ, Jörg ; WIGGENHAGEN, Manfred: *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung*. Heidelberg : Wichmann, 2009. – 5., völlig neu überarbeitete und erweiterte Auflage
- [Girardeau-Montaut 2015] GIRARDEAU-MONTAUT, Daniel: *CloudCompare*. Web. 2015. – URL <http://www.danielgm.net/cc/>. – Zugriffsdatum: 14.10.2015
- [Heipke 2013] HEIPKE, Christian: *Photogrammetrie I – III*. 2013. – Vorlesungsskript - Leibniz Universität Hannover
- [Konecny und Lehmann 1984] KONECNY, Gottfried ; LEHMANN, Gerhard: *Photogrammetrie*. Berlin und New York : de Gruyter, 1984. – 4., völlig neu bearbeitete Auflage
- [Kraus 1996] KRAUS, Karl: *Photogrammetrie Band 2*. Bonn : Dümmler, 1996
- [Kraus 2004] KRAUS, Karl: *Photogrammetrie Band 1*. Berlin : de Gruyter, 2004. – 7. Auflage
- [Luhmann 2010] LUHMANN, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie*. Berlin und Offenbach : Wichmann, 2010. – 3. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage
- [Redecker 2008] REDECKER, Andreas P.: *Verfahren der digitalen Photogrammetrie bei der Auswertung historischer Luftbilder zur Erfassung von Altlastverdachtsflächen*, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2008
- [Tan 2004] TAN, Howard: *ASTER Global Digital Elevation Map Announcement*. Web. 2004. – URL <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. – Zugriffsdatum: 31.10.2015

A Verwendete Programmparameter

Als Orientierungshilfe bei der Wahl von Programmparametern für die Orthophotoerzeugung mit Photoscan ist im Folgenden eine Auswahl der für diese Arbeit verwendeten Parameter aufgeführt.

- Referenz Einstellungen
 - Kameragenauigkeit: 100 m
 - Markierungsgenauigkeit: 1 m
 - Passpunktgenauigkeit: 5 px
- Fotos ausrichten
 - Genauigkeit: Hoch
 - Paar-Vorauswahl: Referenz
 - Key point limit: 50000
 - Verknüpfungspunktlimit: 50000
 - Merkmale durch Maske beschränken: Aktiviert
- Dichte Punktwolke erzeugen
 - Qualität: Hoch
 - Tiefenfilterung: Aggressiv
- Mesh erzeugen
 - Oberflächenart: Höhenfeld
 - Quelldaten: Dichte Punktwolke
 - Flächenzahl: Mittel
 - Interpolation: An
 - Punktklassen: Alle
- Textur erzeugen
 - Abbildungsmodus: Orthophoto
 - Überlagerungsmodus: Mosaik
 - Texturgröße/- anzahl: 8192
 - Farbkorrektur: Deaktiviert

B Differenzen der Kontrollpunkte

In den folgenden Tabellen sind die gemessenen Differenzen an den Kontrollpunkten zwischen dem aktuellen Orthophoto und den generierten historischen Orthophotos zusammengefasst. In der letzten Spalte ist jeweils die berechnete euklidische Distanz aufgeführt.

Table B.1: *Gemessene Differenzen an den Kontrollpunkten im Orthophoto ohne externe Höhendaten der Flüge 181-42-31 und 181-43-31 zum aktuellen Orthophoto.*

Punkt	Rechtsabweichung [m]	Hochabweichung [m]	Abweichung [m]
1	0,07	0,29	0,30
3	0,29	-5,04	5,05
6	8,87	6,20	10,82
7	3,68	-3,31	4,95
8	4,06	-1,83	4,46
9	2,60	-5,83	6,39
10	-1,89	-1,94	2,71
21	10,07	-11,39	15,20
22	-0,41	-1,56	1,61
23	-0,13	-1,40	1,41
24	2,14	8,55	8,82
26	0,83	-3,29	3,39
27	5,59	-0,53	5,62
30	7,92	-1,12	8,00

Table B.2: *Gemessene Differenzen an den Kontrollpunkten im Orthophoto mit externem Höhenmodell der Flüge 181-42-31 und 181-43-31 zum aktuellen Orthophoto.*

Punkt	Rechtsabweichung [m]	Hochabweichung [m]	Abweichung [m]
1	0,22	0,48	0,53
3	1,06	-4,67	4,79
6	-3,11	-7,47	8,09
7	-3,40	-1,00	3,54
8	-3,79	-1,49	4,07
9	-1,42	-3,64	3,91
10	-2,39	-0,70	2,49
21	7,82	-7,56	10,88
22	-0,33	-1,33	1,37
23	-0,08	-3,09	3,09
24	2,94	3,19	4,34
26	0,81	-3,50	3,59
27	6,20	-1,24	6,33
30	4,11	-2,25	4,68

Table B.3: Gemessene Differenzen an den Kontrollpunkten im Orthophoto ohne externes Höhenmodell des Fluges US 33/2570 zum aktuellen Orthophoto.

Punkt	Rechtsabweichung [m]	Hochabweichung [m]	Abweichung [m]
1	9,26	-2,53	9,60
2	8,12	3,60	8,89
3	2,11	-1,85	2,80
4	2,33	-4,73	5,27
5	-9,05	1,94	9,26
6	-1,15	3,96	4,12
7	3,10	4,08	5,12
8	4,91	3,03	5,77
9	2,58	0,80	2,70
10	2,92	2,46	3,82
11	5,57	2,26	6,01
12	6,33	2,95	6,98
13	5,29	1,41	5,48
14	2,04	2,07	2,91
15	2,58	-2,61	3,67
16	-5,42	6,11	8,17
17	-0,35	3,29	3,31
18	-0,33	3,86	3,87
19	-9,66	3,05	10,12
20	4,88	1,91	5,24
22	-8,35	3,31	8,98
23	-4,71	-2,06	5,14
29	-3,36	3,63	4,95

Table B.4: Gemessene Differenzen an den Kontrollpunkten im Orthophoto mit externem Höhenmodell des Fluges US 33/2570 zum aktuellen Orthophoto.

Punkt	Rechtsabweichung [m]	Hochabweichung [m]	Abweichung [m]
1	5,51	-3,56	6,56
2	8,23	3,27	8,85
3	4,77	-1,32	4,95
4	3,94	-6,36	7,48
5	-11,55	1,36	11,62
6	-2,05	3,26	3,85
7	3,43	3,91	5,21
8	6,34	3,71	7,35
9	4,23	2,76	5,05
10	2,68	2,73	3,83
11	2,29	-1,32	2,65
12	5,04	-0,49	5,07
13	5,41	1,12	5,53
14	0,92	1,60	1,84
15	-0,35	-6,75	6,75
16	-5,38	4,48	7,00
17	0,09	3,21	3,21
18	0,52	4,72	4,75
19	-10,07	2,72	10,43
20	4,21	1,06	4,34
22	-7,26	4,27	8,42
23	-5,88	-1,39	6,04
29	-5,92	3,38	6,82